

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRÓNOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

ESTIMACIÓN DEL UMBRAL DE DAÑOS INTERNOS EN PATATA MEDIANTE TECNOLOGÍA NIRS

presentado por

Claudia Pérez Roncal

aurkeztua

Directoras:

Silvia Arazuri Garín

y

Ainara López Maestresalas

**INGENIERO AGRÓNOMO
NEKAZARITZA INGENIARITZA**

Octubre, 2015

ÍNDICE

0.	RESUMEN	2
1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1.	EL CULTIVO DE LA PATATA	5
2.1.1.	TAXONOMÍA Y ORIGEN	5
2.1.2.	MORFOLOGÍA DE LA PLANTA	6
2.1.3.	CLASIFICACIÓN	11
2.2.	IMPORTANCIA ECONÓMICA.....	12
2.2.1.	SITUACIÓN MUNDIAL	12
2.2.2.	SITUACIÓN EN ESPAÑA	15
2.2.3.	SITUACIÓN EN NAVARRA	17
2.3.	VARIETADES SELECCIONADAS	18
2.3.1.	KENNEBEC	18
2.3.2.	BARAKA	18
2.4.	DAÑOS MECÁNICOS	19
2.4.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS DAÑOS MECÁNICOS	19
2.4.2.	DETECCIÓN DE LOS DAÑOS: EL FRUTO ELECTRÓNICO	22
2.4.3.	PREDICCIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS DAÑOS.....	25
2.5.	TECNOLOGÍA NIRS.....	29
2.5.1.	BASES TEÓRICAS.....	29
2.5.2.	INSTRUMENTACIÓN	30
2.5.3.	QUIMIOMETRÍA.....	32
2.5.4.	APLICACIONES NIRS EN PATATA.....	37
3.	MATERIAL Y MÉTODOS	40
3.1.	MATERIAL Y EQUIPOS EMPLEADOS	40
3.1.1.	MATERIAL VEGETAL.....	40
3.1.2.	FRUTO ELECTRÓNICO	41
3.1.3.	EQUIPOS DE COMPRESIÓN E IMPACTO	43
3.1.4.	EQUIPO NIRS	45
3.2.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	46
3.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	50
3.3.1.	ANOVA.....	50
3.3.2.	PLS-DA	50
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1.	IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS Y COMPRESIONES.....	52
4.2.	IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS: ANÁLISIS NIRS	61
5.	CONCLUSIONES	73
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	74

0. RESUMEN

Este estudio se realizó con el objetivo de establecer, por un lado, un umbral de daños en patata mediante la evaluación de una línea real de clasificación y envasado, y, por otro, de identificar los daños internos originados en los tubérculos utilizando un sistema no destructivo, rápido y fiable de análisis en el infrarrojo cercano (NIR).

En primer lugar, se identificaron y describieron un total de 30 puntos en la línea de manipulación estudiada susceptibles de provocar daños mecánicos en los tubérculos, que más tarde se evaluaron utilizando los frutos electrónicos IRD (de Techmark Inc.) y Smart Spud (de PEI Innovations Inc.) con el fin de caracterizar los impactos producidos en cada uno de ellos. Los datos registrados por ambos frutos sirvieron para identificar los puntos críticos de la línea de manera objetiva, estableciéndose un total de 9 puntos críticos. Tras identificar dichos puntos, se procedió a la recogida de muestras en los mismos (90 tubérculos de la variedad Baraka) para determinar el porcentaje de daños reales producidos en los tubérculos a su paso por la línea, lo que sirvió para establecer el umbral de daños correlacionando los datos registrados por los frutos electrónicos con la aparición real del daño.

El siguiente paso consistió en reproducir en laboratorio y bajo condiciones controladas los impactos y compresiones a los que son sometidos los tubérculos en la línea. Los ensayos de impacto (6 y 9 cm de altura de caída) y compresión (2 y 3 mm) se llevaron a cabo utilizando un impactador vertical (de caída libre) y un texturómetro TA-XT2 (de Stable Micro Systems), respectivamente, y empleando los mismos 100 tubérculos de la variedad Kennebec en ambos ensayos. Una vez aplicada la carga mecánica, se analizaron las muestras (sin pelar) con un espectrofotómetro AOFT-NIR Luminar 5030 (de Brimrose) para obtener los espectros de reflectancia de las mismas, estableciéndose dos grupos: el control (tubérculos antes de aplicar la carga mecánica) y el grupo dañado (tubérculos transcurridas 1, 5, 9 y 24 horas de la aplicación de la carga). Por último, se realizó un análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) con los datos espectrales de estos dos grupos, aplicando los pretratamientos espectrales SNV y MC de manera simultánea. La precisión global del modelo se determinó por el porcentaje de muestras clasificadas correctamente, y por la sensibilidad y especificidad de cada clase.

Los resultados indicaron que combinando la espectrometría NIR con el método multivariante PLS-DA, considerando los datos espectrales de impacto a 6 y 9 cm de altura de caída, es posible diferenciar de forma clara los tubérculos dañados de los sanos con unos porcentajes de clasificación en la validación del modelo superiores al 85%. Sin embargo, los modelos desarrollados para diferenciar los daños que aparecen en los tubérculos transcurridas 1, 5, 9 y 24 horas desde la aplicación de los impactos, indicaron que, para este caso concreto, no se consigue una clara diferenciación de los daños en función de la hora de estudio.

Los resultados obtenidos en este estudio plantea la posibilidad de introducir estas técnicas en las líneas de clasificación y envasado de patata, con el fin de identificar y gestionar de forma adecuada los tubérculos dañados antes de su venta, reduciendo así las pérdidas económicas asociadas a estos daños.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La patata es uno de los principales cultivos alimenticios a nivel mundial, por detrás del maíz, el arroz y el trigo, con una producción anual que superó los 360 millones de toneladas en el año 2013 (FAOSTAT, 1990-2013). A pesar de su uso alimentario en forma de producto fresco o procesado, una parte importante de su producción se destina a fines como la elaboración de piensos o su utilización como tubérculo-semilla, lo que hace que se considere un cultivo esencial desde un punto de vista industrial y agronómico.

El cultivo de la patata ha tenido siempre una gran importancia en Navarra, al considerarse la producción de patata de siembra, principalmente, una actividad tradicional en esta Comunidad Autónoma. Sin embargo, la producción de estos tubérculos ha sufrido un descenso progresivo en los últimos años, afectando tanto a la patata de consumo como a la de siembra.

Este cultivo se encuentra hoy en día totalmente mecanizado desde la plantación hasta la recolección y manipulación (Bueno y Expido, 2006). Dicha mecanización provoca la aparición de daños en los tubérculos, debidos principalmente a impactos y compresiones producidos durante el proceso de cosecha y posterior manipulación, que ocasionan pérdidas cualitativas y cuantitativas importantes. Los daños derivados de este proceso, generalmente no identificables a simple vista, influyen de forma determinante en el valor final del producto, provocando por un lado pérdidas económicas significativas y por otro, un descenso en el grado de confianza del consumidor hacia este producto.

Debido a la importancia que suponen las pérdidas de frutos por daños mecánicos y la creciente demanda de productos de calidad, se considera esencial identificar los puntos de mayor riesgo para poder así minimizar sus consecuencias. Con este propósito se desarrollaron los frutos electrónicos, que permiten determinar de forma rápida los puntos críticos en una línea de manipulación que mayores daños provocan en los tubérculos.

En los últimos años, las técnicas no destructivas empleadas para la evaluación de la calidad y la clasificación de frutas y verduras, están ganando cada vez más importancia. Entre las tecnologías no destructivas más utilizadas actualmente se encuentra la espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS), una técnica rápida, fiable y no contaminante que permite predecir la composición química y las características físicas de las muestras, detectar los daños y enfermedades, y clasificarlas en base a estos parámetros (Rady y Guyer, 2015).

Siguiendo esta línea de estudio se ha desarrollado el presente trabajo, con el que se pretende establecer un método de estimación de daños internos en patata mediante espectroscopía NIR, a través del análisis quimiométrico de los espectros de reflectancia de las muestras. Para ello, por un lado se evaluaron los daños producidos en una línea real de clasificación y envasado de patata, y, por otro, se comprobó la capacidad de la tecnología NIRS para clasificar los tubérculos en base a la presencia o no de estos daños. Todo ello con el fin de proponer medidas correctoras en la línea de manipulación que ayuden a reducir daños en los tubérculos, además de una identificación mediante tecnología no destructiva de frutos dañados antes de que lleguen al consumidor final.

Los objetivos planteados en el trabajo fueron los siguientes:

- Establecer un umbral de daños en patata mediante la evaluación de los puntos críticos en una línea real de clasificación y envasado.
- Identificar los daños internos producidos en los tubérculos mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. EL CULTIVO DE LA PATATA

2.1.1. TAXONOMÍA Y ORIGEN

La patata es una planta perteneciente a la familia *Solanaceae*, cuyo nombre científico es *Solanum tuberosum* L. Esta especie solanácea se divide a su vez en dos subespecies ligeramente diferentes: la *ssp. andigena* adaptada a periodos cortos de luz y cultivada principalmente en la zona de los Andes, y la *ssp. tuberosum* adaptada a condiciones de días largos y cultivada en todo el mundo. Este último grupo, originario de Chile, se piensa que surgió del cruce entre cultivares andinos y la especie silvestre *Solanum tarijense*, localizada en el sur de Bolivia y norte de Argentina, extendiéndose después por Europa hasta convertirse rápidamente en los cultivares modernos predominantes (Spooner y Hetterscheid, 2006).

La historia de la patata comienza con las especies de patata silvestres distribuidas desde el sudoeste de los Estados Unidos hasta el centro de Argentina y Chile hace alrededor de 13.000 años (Bradshaw y Ramsay, 2009), pero no es hasta 3.000-7.000 años después cuando se empiezan a domesticar estas plantas silvestres, cultivándose las primeras patatas probablemente de poblaciones seleccionadas de los Andes centrales de Perú y Bolivia, cerca del lago Titicaca situado a 3.800 metros de altitud (Anónimo, 2008; Spooner y Hetterscheid, 2006).

La difusión de este cultivo desde Sudamérica al resto del mundo se inicia con el descubrimiento del tubérculo por exploradores españoles en las tierras bajas de Chile en 1551 (Salaman, 1949) y en los Andes en 1552 (López de Gómara, 1552). La primera constancia del cultivo de patata en Europa data de 1567 en las Islas Canarias. Se piensa que procedieron de diversas mezclas de variedades andinas y chilenas, pero son estas últimas las que probablemente mejor se adaptaron, convirtiéndose rápidamente en la principal fuente de germoplasma para los cultivares europeos (Ríos *et al.*, 2007).

2.1.2. MORFOLOGÍA DE LA PLANTA

La patata (*Solanum tuberosum* L.) es una planta herbácea perenne, pero en agricultura se utiliza como cultivo anual. Generalmente se emplean tubérculos-semilla para su propagación, los cuales producen brotes a partir de las yemas presentes en los ojos del tubérculo. De estos brotes se forman los tallos, hojas, raíces, inflorescencias y la siguiente generación de tubérculos de la nueva planta (Struik, 2007).

En la Figura 1 se muestra la morfología de una planta normal de patata formada a partir de un tubérculo-semilla, incluyendo ambas partes: la subterránea y la aérea.

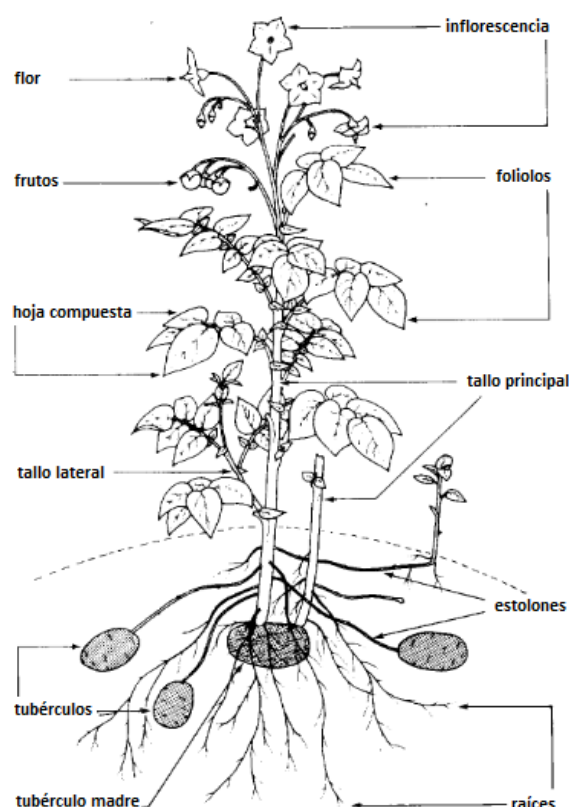


Figura 1. Morfología de la planta de patata (Huamán, 1986)

a. Raíces

La planta de patata puede desarrollarse a partir de verdaderas semillas o de tubérculos. Las plantas que crecen de semillas forman una fina raíz pivotante con ramificaciones laterales, mientras que las que crecen de tubérculos primero forman raíces adventicias en la base de cada brote y después encima de los nudos de la parte subterránea de cada tallo. En ocasiones, pueden crecer raíces en los estolones.

El tipo de sistema radicular varía desde delicado y superficial hasta fibroso y profundo. En comparación con otros cultivos el sistema radicular de la patata es débil, por lo que es necesaria una buena condición del suelo para su desarrollo (Huamán, 1986).

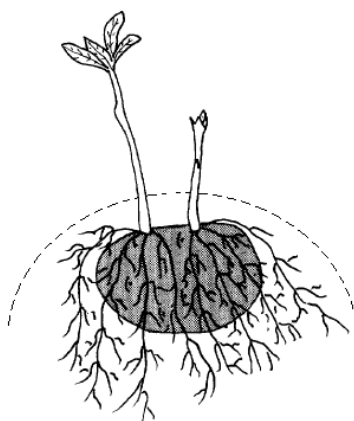


Figura 2. Raíces adventicias formadas de un tubérculo-semilla (Huamán, 1986)

b. Tallos

Presenta tres tipos de tallos, un tallo aéreo de sección transversal angular o circular, y dos subterráneos: los estolones y los tubérculos.

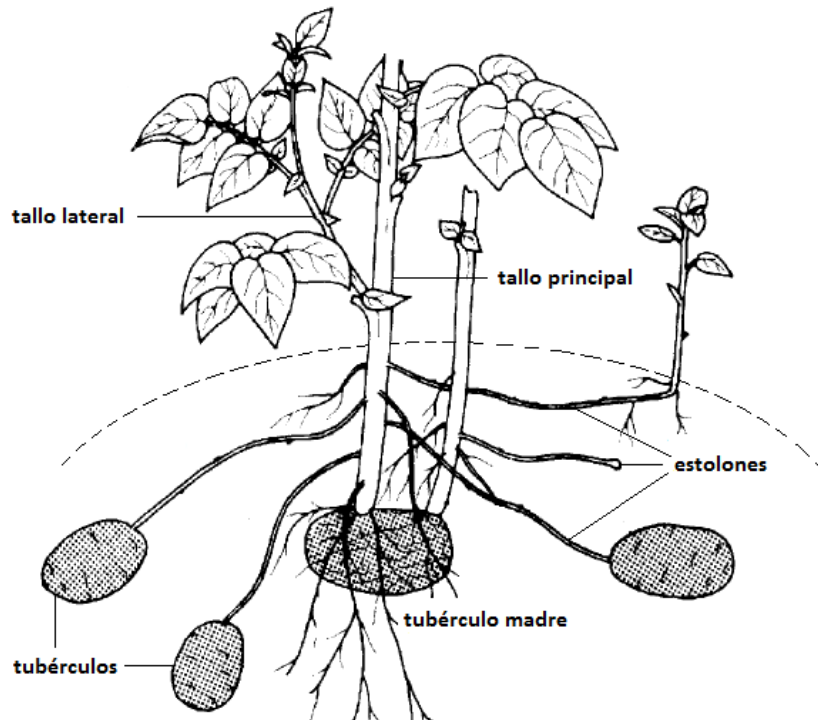


Figura 3. Tipos de tallos de una planta de patata (Struik, 2007)

Tallos aéreos

El sistema de tallos aéreos está formado por uno o varios tallos principales, en función de si la planta se formó a partir de una semilla o un tubérculo respectivamente, y por tallos laterales, ramificaciones de los primeros.

El color de los tallos es generalmente verde, aunque en ocasiones presentan un color marrón-rojizo o morado. Pueden ser sólidos o parcialmente huecos, y suelen presentar nervios en los márgenes de los tallos angulares, pudiendo ser estos lisos, ondulados o dentados.

Las yemas formadas en las axilas de las hojas pueden desarrollarse en tallos laterales, estolones, inflorescencias, o incluso en tubérculos aéreos (Huamán, 1986).

Estolones

Los estolones son tallos laterales que crecen horizontalmente por debajo del terreno a partir de los nudos basales de los tallos aéreos. Pueden desarrollarse hasta tres estolones por nudo, uno principal y dos de las yemas axilares del mismo nudo (Struik, 2007).

Constituyen los rizomas de la planta de patata y suelen formar tubérculos por el agrandamiento de su extremo terminal, aunque no todos los estolones forman tubérculos (Huamán, 1986).

Tubérculos

Los tubérculos son tallos modificados que presentan diversas formas en función de la variedad, desde redondas hasta ovaladas y alargadas, y constituyen el principal órgano de almacenamiento de la planta de patata al contener altos niveles de almidón y proteínas.

Un tubérculo posee dos extremos: el extremo basal (talón) unido al estolón y el extremo opuesto llamado extremo distal o apical. Los ojos del tubérculo, que se corresponden con los nudos de los tallos, están dispuestos en forma de espiral sobre la superficie, concentrándose hacia el extremo apical. Estos se encuentran en las axilas de las hojas o cejas, pudiendo ser elevadas, superficiales o profundas en función de la variedad.

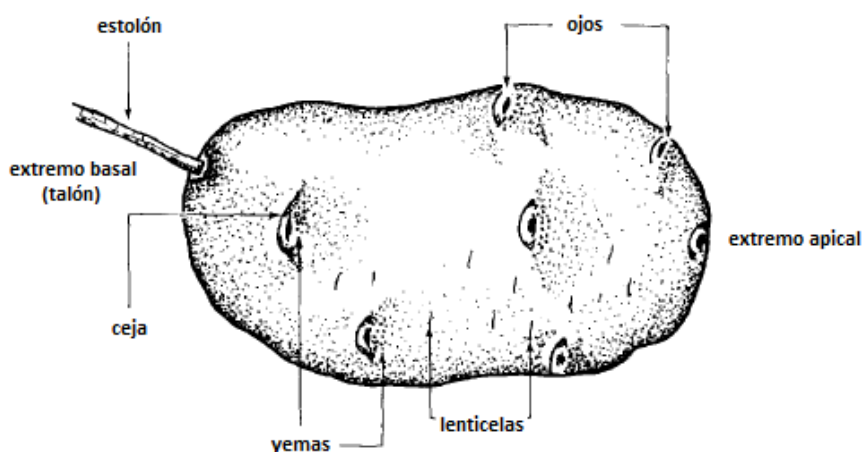


Figura 4. Partes del tubérculo de la planta de patata (Huamán, 1986)

Las yemas de los ojos, que representan las yemas axilares de las hojas, crecen para formar los brotes y un nuevo sistema de tallos principales, tallos laterales y estolones. Generalmente, estas yemas se encuentran latentes durante la madurez del tubérculo y tras un determinado tiempo la latencia se rompe con el brote de las yemas apicales de los ojos.

En la sección longitudinal del tubérculo (Figura 5) se pueden observar los siguientes elementos (desde el exterior al interior): piel o peridermo, córtex, sistema o anillo vascular, parénquima de reserva o zona perimedular y médula.

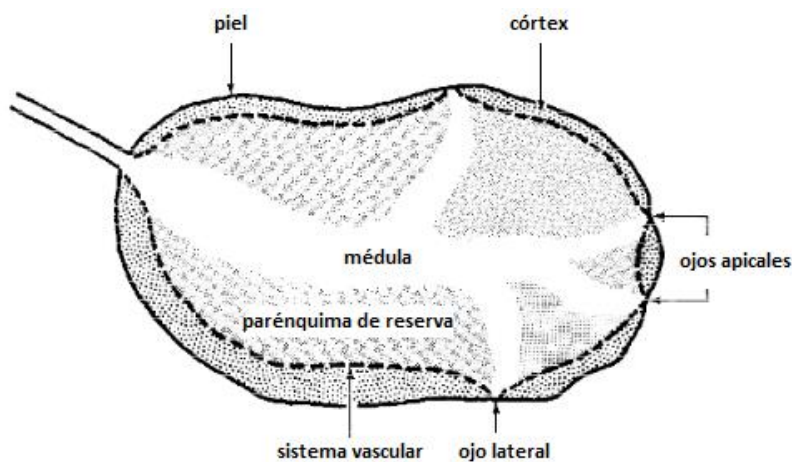


Figura 5. Sección longitudinal del tubérculo (Huamán, 1986)

La piel es una capa protectora exterior del tubérculo y puede presentar diversos colores, variando entre blanco y crema, amarillo, naranja, rojo o morado. Generalmente es de tacto suave aunque en algunas variedades es rugosa. Cuando el tubérculo está inmaduro es fácil separar la piel mediante el roce, por lo que los daños producidos durante la cosecha de patatas inmaduras son frecuentes.

El resto de elementos desde el córtex hasta la médula constituyen la carne del tubérculo, siendo generalmente de color blanco, crema o amarillo pálido en las variedades comerciales (Huamán, 1986).

c. Hojas

La planta de patata posee una hoja principal por nudo, dispuestas en espiral a lo largo del tallo. Son hojas compuestas imparipinnadas formadas por tres o cuatro pares de folíolos primarios, de forma alargada, ovoide u ovalada, dispuestos a lo largo de un nervio central o raquis. Éste posee un folíolo alargado en su extremo y está unido al tallo a través del peciolo. Entre los folíolos primarios pueden formarse otros de menor tamaño y de forma ovoide o semicircular. Los folíolos pueden unirse directamente al raquis (sésiles) o por medio de pequeños tallos llamados pedicelos.

El tamaño y la forma de las dos pequeñas hojas que crecen en la base del peciolo, así como el ángulo de inserción del peciolo en el tallo, sirven para diferenciar las propiedades varietales de cada planta (Huamán, 1986; Struik, 2007).

d. Inflorescencias

La inflorescencia de la planta de patata consta de un tallo principal (pedúnculo) dividido normalmente en dos ramas, las cuales se dividen a su vez en otras dos, formando lo que se denomina una inflorescencia cimosa. De las ramas surgen los tallos de las flores (pedicelos), que presentan una articulación de la que cuelgan las flores o los frutos.

Las flores de la patata son bisexuales y poseen las cuatro partes esenciales de una flor: cáliz, corola, estambres y pistilo. El cáliz, de forma acampanada, se compone de cinco sépalos parcialmente unidos en la base y de color verde o pigmentado. La corola consta de cinco pétalos unidos en la base que forman una estructura tubular corta y una superficie plana con los cinco lóbulos. El color de la corola varía desde blanco, azul claro y azul, hasta rojo y morado, con diferentes tonos e intensidades. La flor consta de cinco estambres, alternados con los pétalos, formados por anteras que se fusionan creando una columna cónica que encierra al pistilo (Huamán, 1986).

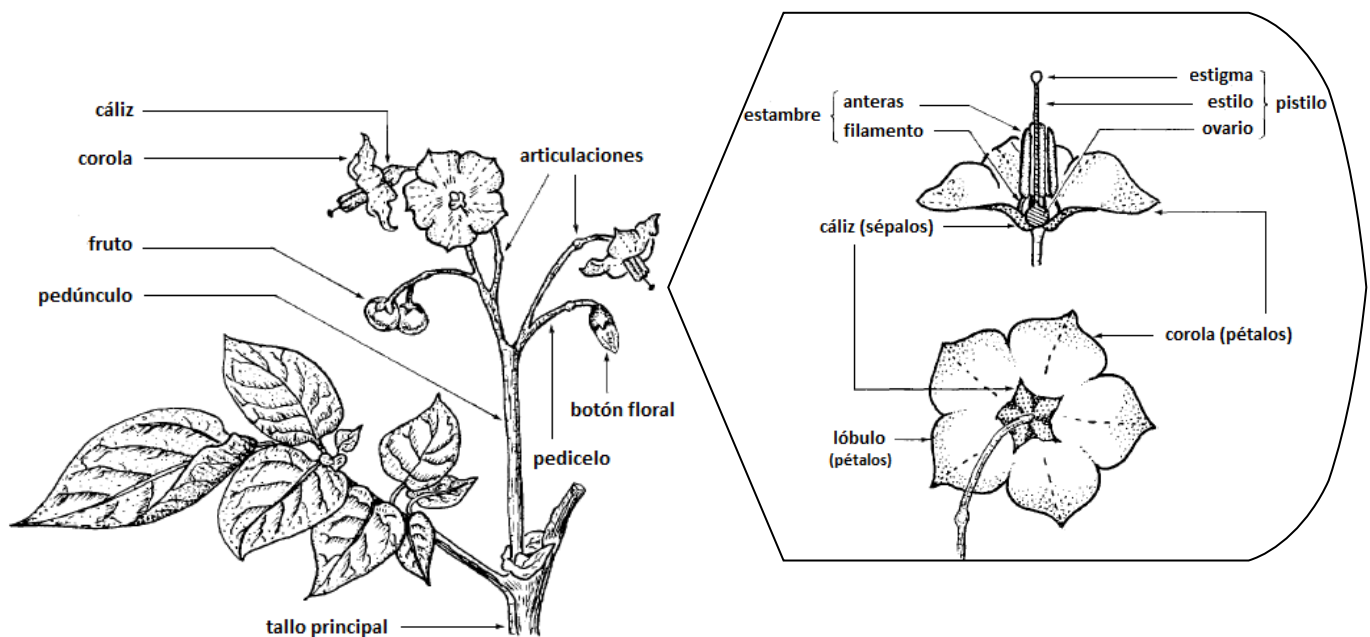


Figura 6. Inflorescencia cimosa (Huamán, 1986)

e. Frutos

El fruto de la patata es una baya generalmente verde y de forma esférica, aunque algunos cultivares producen frutos ovoides o cónicos con manchas blancas o pigmentadas. Contienen numerosas semillas de pequeño tamaño y de forma plana y ovalada, pudiendo alcanzar hasta más de 200 semillas por fruto dependiendo de la fertilidad de cada variedad.

Estas semillas también se conocen como verdaderas semillas o semillas botánicas, a diferencia de los tubérculos, conocidos como tubérculos-semillas, cuando se utilizan para la producción de un cultivo de patata (Huamán, 1986).

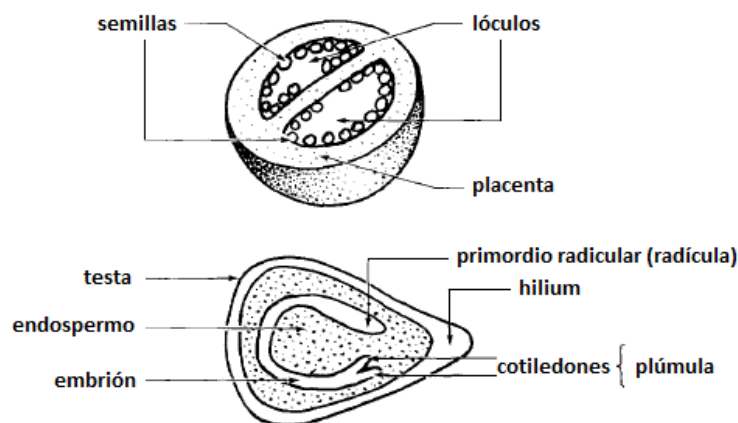


Figura 7. Fruto de la planta de patata (Huamán, 1986)

2.1.3. CLASIFICACIÓN

En la clasificación de patatas se emplean diversos criterios basados en los caracteres varietales, tales como el color y textura de la piel, color de la carne o forma del tubérculo, características de los brotes y de la parte aérea, productividad o resistencia a plagas y enfermedades, entre otros. Pero el criterio agronómico más utilizado en la clasificación de variedades es la duración del ciclo de cultivo (García, 2011).

Atendiendo a este criterio, las patatas se agrupan en cuatro categorías:

- Precoces (Extratemporanas): ciclo inferior a 90 días.
 - Carne amarilla: Anais, Gauna, Palogán
 - Carne blanca: Blanka, Mariana
 - Carne amarilla pálida: Jaerla, Monalisa
- Semitemperanas (Temperanas): ciclo entre 90 y 120 días.
 - Carne amarilla: Hermes, Duquesa, Idoia, Spunta
 - Carne blanca: Arran-Banner, Kennebec, Red Pontiac
 - Carne amarilla pálida: Marfona
- Semitardías (Media Estación): ciclo entre 120 y 150 días.
 - Carne amarilla: Agria, Belda, Desirée, Edurne
 - Carne blanca: Olalla
 - Carne amarilla pálida: Fina
- Tardías: ciclo entre 150 y 200 días.
 - Carne amarilla: Álava, Baraka, Goya
 - Carne blanca: Turia, Victor

2.2. IMPORTANCIA ECONÓMICA

En la actualidad, la patata se cultiva en aproximadamente 150 países por todo el mundo, en clima templado, subtropical y tropical. Debido a la capacidad de adaptación de esta planta, no son necesarias unas condiciones de suelo y de cultivo ideales para su correcto desarrollo.

Las propiedades de la patata, en especial su valor nutritivo, hacen de este cultivo uno de los principales productos alimenticios a nivel mundial, ocupando el cuarto lugar en producción después del maíz, el arroz y el trigo. Pero además de este uso alimentario, la patata se destina a diversos fines de carácter industrial y agronómico. Según datos de la FAO, aproximadamente el 68% de los 374 millones de toneladas de patata producidas a nivel mundial en 2011 se destinaron al consumo alimentario de las personas, en forma de producto fresco o procesado. El resto se empleó en la elaboración de piensos para el ganado (13%), la utilización del almidón y la obtención de etanol de manera industrial (10%), y como tubérculo-semilla (9%) (FAOSTAT, 1990-2013).

2.2.1. SITUACIÓN MUNDIAL

El sector mundial de la patata ha sufrido grandes cambios en las últimas décadas. Hasta el inicio de los años 90, casi la totalidad de las patatas se producían y consumían en Europa, América del Norte y en los países de la antigua Unión Soviética. Desde entonces, la producción y la demanda de patata en Asia, África y América Latina se han incrementado de manera considerable. Para satisfacer esta demanda la producción aumentó de aproximadamente 30 millones de toneladas a principios del decenio de 1960 a más de 228 millones en 2013. Por primera vez, en el año 2005 la producción de patata en los países en desarrollo superaba la de los países desarrollados (Figura 8).

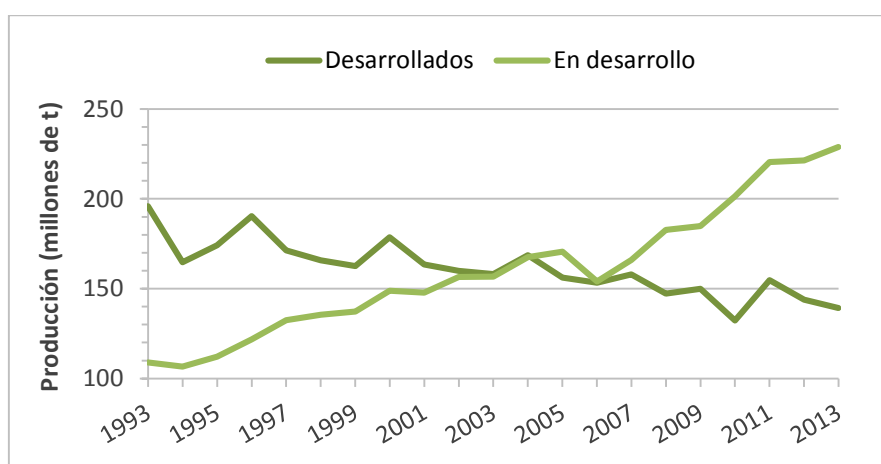


Figura 8. Producción mundial de patata, 1993-2013
(Elaboración propia; Fuente: FAOSTAT, 2015)

China se ha convertido en el primer productor de patata a nivel mundial y algo más de una tercera parte de la producción total se cosecha en China y la India (Tabla 1).

Tabla 1. Principales países productores de patata, 2013

	Producción (t)	Superficie (ha)
1. China	95.987.500	5.616.500
2. India	45.343.600	1.992.200
3. Federación de Rusia	30.199.126	2.087.824
4. Ucrania	22.258.600	1.391.625
5. Estados Unidos	19.843.919	425.730
6. Alemania	9.669.700	242.800
7. Bangladesh	8.603.000	443.934
8. Francia	6.975.000	160.700
9. Países Bajos	6.801.000	155.800
10. Polonia	6.334.200	337.200

Fuente: FAOSTAT (2015)

Actualmente, se cultivan más de 19 millones de hectáreas de patata en el mundo con una producción que alcanzó los 368 millones de toneladas en 2013. En Europa se producen más de 112 millones de toneladas de patata en más de 5 millones de hectáreas, con un rendimiento de 19,73 t/ha, siendo los principales países productores Rusia (26,42%), Ucrania (19,47%), Alemania (8,46%) y Francia (6,10%). España que representa el 1,92%, es el decimoprimer productor europeo (FAOSTAT, 1990-2013).

Asia y Europa son las principales regiones productoras de patata del mundo y en 2013 suministraron el 80% de la producción mundial. África, a pesar de ser una de las regiones menos productoras junto con Oceanía, en los últimos años ha incrementado su producción pasando de 16 millones de toneladas en 2007 a 30 millones en 2013. América del Norte, con el mejor valor de rendimiento a nivel mundial (43,08 t/ha), es el primer productor del continente.

Tabla 2. Producción de patata por regiones, 2013

Región	Producción (t)	Superficie (ha)	Rendimiento (t/ha)
Mundo	368.096.000	19.463.000	18,91
África	30.198.700	2.005.330	15,06
América	42.620.000	1.627.960	26,18
América del Norte	24.465.000	567.875	43,08
América Central	2.533.801	100.680	25,17
América Latina	15.621.200	959.404	16,28
Asia	180.460.000	10.058.600	17,94
Europa	112.980.000	5.725.710	19,73
Oceanía	1.836.830	45.476	40,39

Fuente: FAOSTAT (2015)

Con respecto al consumo, más de la mitad del suministro mundial de patata se consume en Asia aunque, debido a su enorme población, el consumo per cápita fue de apenas 30 kg en 2011. Los mayores consumidores de patata en 2011 fueron los europeos con 84,20 kg/persona, mientras que África presentó el valor más bajo (Tabla 3).

Tabla 3. Consumo de patata por regiones, 2011

Región	Población	Consumo alimentos (t)	Consumo (kg/persona)
Mundo	6.997.990.000	240.179.000	34,90
África	1.056.990.000	18.148.000	18,70
América	952.500.000	34.482.000	36,40
América del Norte	349.464.000	20.218.000	57,90
América Central	199.811.000	2.425.000	12,14
América Latina	398.014.000	11.839.000	29,80
Asia	4.210.000.000	123.769.000	29,50
Europa	741.274.000	62.362.000	84,20
Oceanía	37.228.000	1.418.000	47,90

Fuente: FAOSTAT (2015)

2.2.2. SITUACIÓN EN ESPAÑA

Los últimos años, han supuesto un cambio importante desde el punto de vista productivo y comercial en el sector español de la patata. En las últimas dos décadas, la superficie dedicada a este cultivo en España se ha reducido algo más de dos tercios, pasando de 271.300 ha en 1990 a 71.100 ha en el año 2013. Esta misma tendencia se observa en el consumo de patata, que disminuye desde un valor de 108,5 kg/persona registrado en 1990 a 62 kg/persona en 2011. A pesar de este descenso, se han incrementado tanto las exportaciones como las importaciones de terceros países, siendo estas últimas en 2011 de aproximadamente el triple de las 566.000 t importadas en 1990 (FAOSTAT, 1990-2013).

Debido al descenso de la superficie de patata cultivada y de su consumo, la producción de patata en España se ha reducido un 54% en los últimos veinte años, que junto con el notable aumento de las importaciones, principalmente de Francia, han contribuido al desequilibrio de los mercados de patata españoles.

Tabla 4. Balance de la patata en España, 2001-2011

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Producción (miles de t)	2.992	3.078	2.665	2.774	2.563	2.515	2.480	2.145	2.719	2.327	2.455
Importaciones	1.152	1.139	1.376	1.478	1.497	1.644	1.504	1.637	1.696	1.752	1.563
Exportaciones	269	237	279	257	269	258	278	285	308	274	289
Suministro interno	3.960	3.733	3.919	3.855	3.806	3.927	3.737	3.616	4.013	4.093	3.997
Consumo (kg/persona/año)	75,8	72,3	72,0	71,5	68,2	69,0	65,3	60,5	67,2	63,0	62,0

Fuente: FAOSTAT (2015)

Sin embargo, a pesar de la reducción en la producción de patata y la superficie cultivada, se ha observado un aumento del rendimiento del cultivo en la última década.

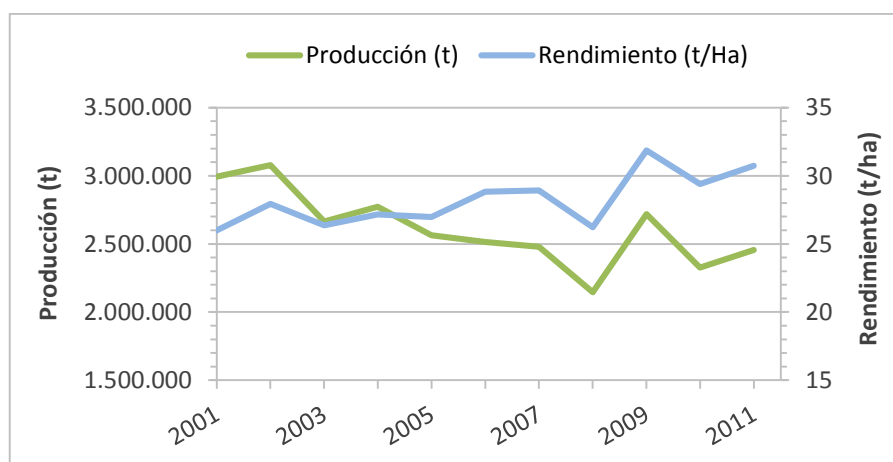


Figura 9. Evolución del cultivo de patata, 2001-2011
(Elaboración propia; Fuente: FAOSTAT, 2015)

En cuanto a la distribución por comunidades autónomas, Castilla y León es la principal productora de patata en España con el 40% de las 2.182.082 toneladas producidas en 2013, seguida de Galicia (20,2%) y Andalucía (11,8%) (MAGRAMA, 2002-2013).

A continuación se detallan los datos de superficie y producción para cada tipo de patata cultivada en España en el periodo 2002-2012. Como se puede observar, las patatas que ocupan mayor superficie son las de media estación y las tardías.

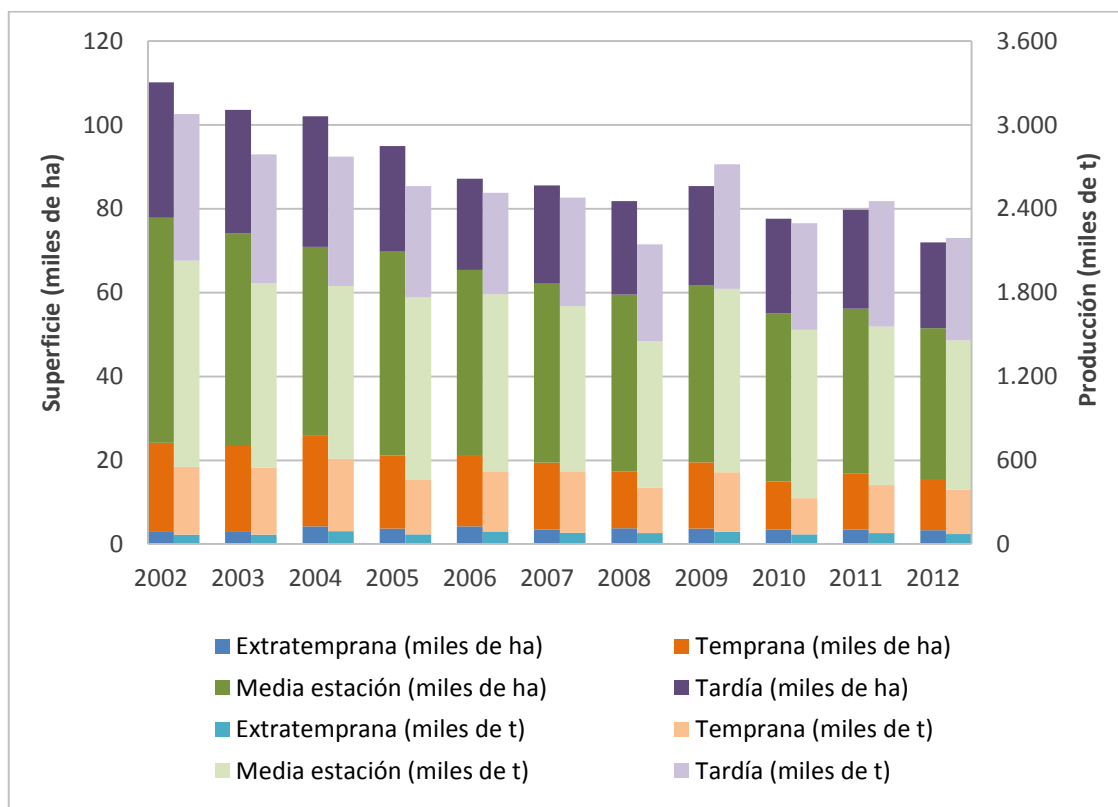


Figura 10. Evolución de la superficie de patata por tipos, 2002-2012
(Elaboración propia; Fuente: MAGRAMA, 2015)

2.2.3. SITUACIÓN EN NAVARRA

El cultivo de patata en Navarra ha sufrido un descenso progresivo en los últimos años, bajando desde las más de 24.230 t producidas en 1.115 ha en el año 2000 hasta las 13.086 t producidas en 562 ha en 2013. Aunque la disminución del cultivo ha afectado tanto a la patata de consumo como a la de siembra, este descenso ha sido más acusado para el primer grupo (Figura 11).

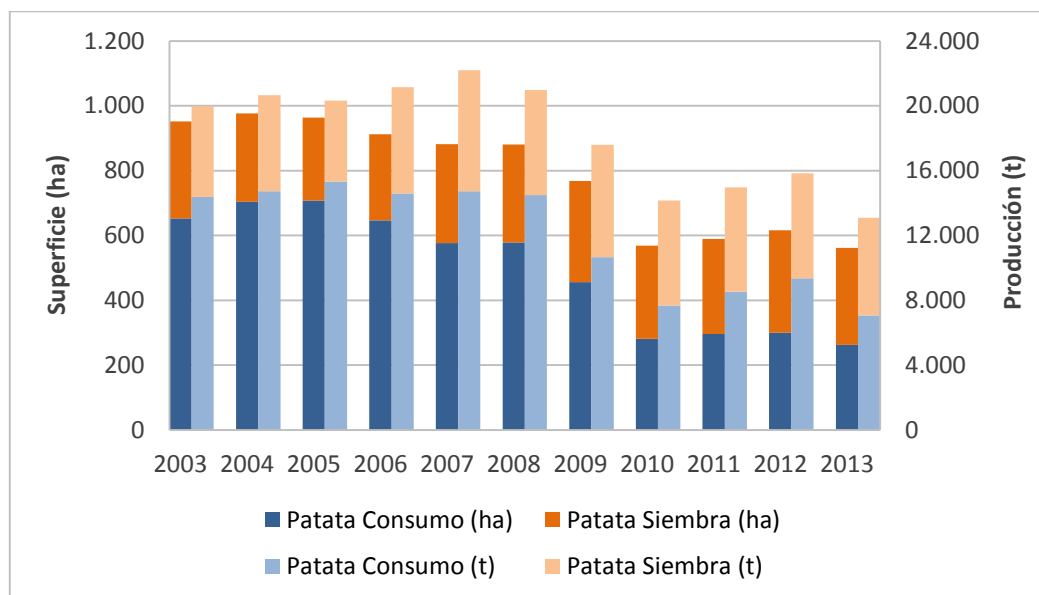


Figura 11. Superficie y producción de patata en Navarra, 2003-2013
(Elaboración propia; Fuente: Navarra.es, 2015)

Aproximadamente, el 80% de la patata de consumo producida en Navarra es de media estación, siendo el 20% restante patata tardía, mientras que la totalidad de la patata de siembra cultivada es tardía (Anónimo, 2000-2013).

En Navarra, la producción de patata de siembra se localiza en tres zonas: Pirineos, Codés y Valdizarbe, concentrándose la mayor parte de la superficie en la Zona del Pirineo. Actualmente, las entidades productoras de patata de siembra en Navarra son dos: OPPOSA (Organización de la Patata en el Pirineo Occidental S.A.), que opera en todas las zonas productoras, y la Cooperativa N^º 5 de Ocón de Bernedo (Álava) que opera en la Zona de Codés (Anónimo, 2014)

2.3. VARIEDADES SELECCIONADAS

En la actualidad existe un gran número de variedades comerciales de patata disponibles en el mercado, por lo que la elección de una determinada variedad dependerá de las condiciones en las que se vaya a realizar el cultivo y del destino final de la cosecha.

Entre las variedades que se cultivan en Navarra están: Agria, Baraka, Jaerla, Kennebec, Monalisa y Red Pontiac (Anónimo, 2011). A continuación, se describen las variedades de patata seleccionadas para la realización del trabajo.

2.3.1. KENNEBEC



Figura 12. Variedad Kennebec

Se trata de una planta de porte semierecto a erecto, con buena cobertura de hojas y escasa floración, de color blanca. Los tubérculos son redondos y ovalados, con ojos superficiales de color amarillo, piel amarilla pálida y lisa, y de carne blanca.

Se presenta como una variedad semitemprana y de alto rendimiento, con una baja producción de tubérculos por planta, uniformes y de gran tamaño. Estos presentan resistencia media tanto a los daños externos como a la aparición de moratones internos.

Debido a sus características posee una aptitud buena para la cocción, ya que mantiene una textura harinosa y firme tras el proceso, además de una aptitud buena como patata frita. Tanto el contenido de materia seca como el de almidón son medios (Anónimo, 2005b; Peeten *et al.*, 2011).

2.3.2. BARAKA

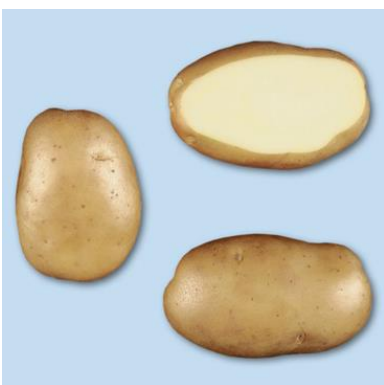


Figura 13. Variedad Baraka

Se trata de una planta de porte semierecto a erecto, con buena cobertura de hojas y frecuente floración, de color rojo violeta. Los tubérculos son ovalados y largos, con ojos superficiales de color amarillo. Poseen una piel amarilla pálida, de textura lisa y en ocasiones algo rugosa, y carne amarilla.

Se presenta como una variedad de patata tardía y de alto rendimiento, con una producción media de tubérculos por planta, uniformes y de gran tamaño. Estos son resistentes a los daños externos y presentan cierta resistencia a la aparición de moratones internos. Además, se obtienen altos rendimientos en cosechas tempranas del cultivo.

Debido a sus características, al igual que la variedad Kennebec, posee una buena aptitud tanto para la cocción, manteniendo una textura harinosa y consistente, como para patata frita. El contenido de materia seca es de medio a alto y el de almidón medio (Anónimo, 2005a; Peeten *et al.*, 2011).

2.4. DAÑOS MECÁNICOS

La mecanización de todo el proceso de producción en los cultivos hortícolas al aire libre supone un factor fundamental para la reducción de los costes y el incremento de la rentabilidad de estos cultivos (Ruiz, 1989).

Hoy en día el cultivo de la patata está totalmente mecanizado desde la plantación hasta la recolección y manipulación. En los últimos años se ha acelerado el desarrollo de la mecanización debido a la progresiva falta de mano de obra en las zonas productoras y, con este desarrollo, el nivel de daños ocasionados en las patatas ha ido en aumento (Bueno y Expido, 2006). Los daños en tubérculos producidos durante la cosecha y posterior manipulación son una de las principales causas que provocan la disminución de la calidad de las patatas y de su valor final en el mercado, además de incrementar la incidencia de pérdidas y enfermedades durante el almacenamiento (Bentini *et al.*, 2006).

Según una investigación americana (Peters, 1996), el 70% de los daños ocasionados en los tubérculos se producen durante la cosecha, y el 30% restante durante el transporte y el almacenamiento de los mismos.

Existen diversos factores que influyen en la producción de daños mecánicos en tubérculos. Por un lado están las características de las máquinas empleadas para la cosecha, transporte y manipulación del producto, y por otro, las características mecánicas, físicas y biológicas de los tubérculos que afectan a su respuesta a los impactos. El nivel de hidratación de los tubérculos, el cultivar y las condiciones ambientales durante el crecimiento, cosecha y almacenamiento influyen en la susceptibilidad de estos a sufrir daños (Bentini *et al.*, 2006).

2.4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DAÑOS MECÁNICOS

Los daños mecánicos aparecen debido a los impactos, compresiones y fricciones producidos en las distintas fases del proceso productivo de la patata, originados por el impacto de los tubérculos con los elementos fijos y móviles de las máquinas, con piedras, tierra, o por el choque entre ellos mismos (Arazuri, 2012; Bentini *et al.*, 2006).

Durante este proceso, los tubérculos se exponen a fuerzas mecánicas dinámicas rápidas (impactos), de corta duración, y a fuerzas cuasi-estáticas (compresiones) durante un tiempo relativamente largo. Los impactos se generan principalmente por los golpes contra elementos mecánicos y contra otros tubérculos, mientras que en las compresiones, la principal causa se debe al apilamiento de los tubérculos durante un tiempo prolongado de almacenamiento (Molema *et al.*, 2000).

El alcance y los tipos de daños ocasionados en las patatas dependen del tipo de carga al que se someten y de la energía absorbida, además de las interacciones con las propiedades físicas y bioquímicas de los tubérculos (Rady, 2013). Hughes (1980) clasificó estos daños estableciendo qué propiedades de los tubérculos influyen en los principales daños sufridos por las patatas cuando se someten a cargas mecánicas (Figura 14).

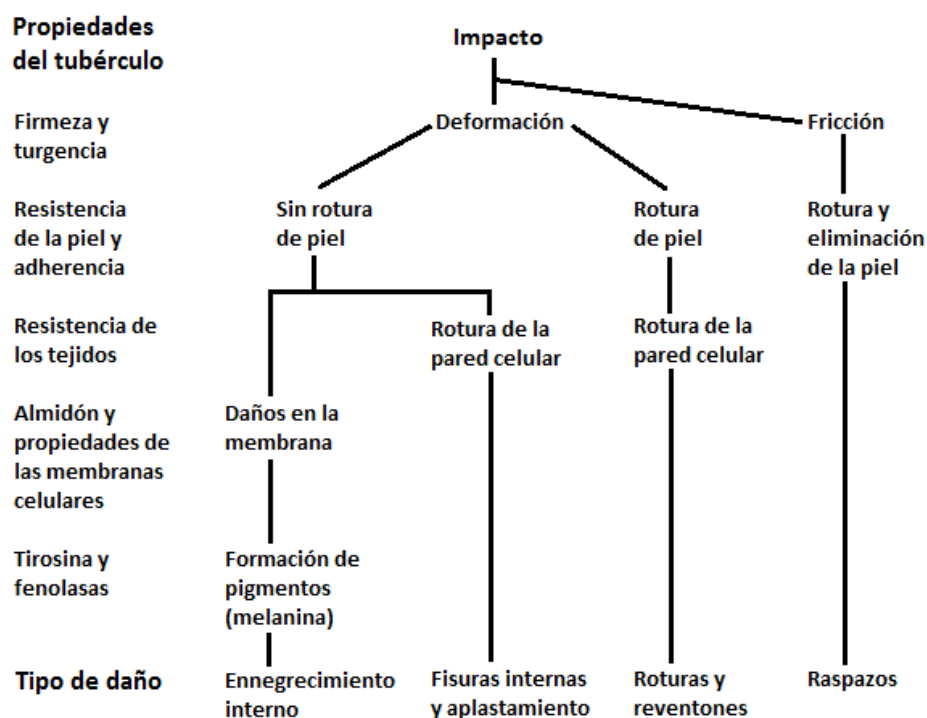


Figura 14. Diagrama de representación de la influencia que tienen las propiedades de los tubérculos en los principales tipos de daños sufridos por las patatas cuando se someten a cargas mecánicas (Hughes, 1980 citado en (Baritelle *et al.*, 2000))

Noble (1985) perfeccionó el sistema propuesto por Hughes al clasificar los diferentes tipos de daños por roturas, proporcionando además ilustraciones de cada tipo de daño. Más tarde, Baritelle *et al.* (2000) incluyeron dos nuevas clases: nudo blanco/mancha blanca y reventones externos. Este sistema de clasificación se centra principalmente en los aspectos físicos de los daños más que en los químicos, ya que la resistencia de los tejidos es la característica más importante y da una idea de la condición del tubérculo.

Los daños en los tubérculos de la patata se dividen en dos categorías: daños externos y daños internos (Baritelle *et al.*, 2000).

Daños externos

- **Raspazos:** son daños superficiales en los que la piel del tubérculo se elimina parcialmente debido a la fricción, dejando la carne expuesta. La manipulación agresiva del tubérculo y una piel inmadura son los principales causantes de estos daños (Bohl, 2006). Como consecuencia, se pierde una mayor cantidad de agua durante el almacenamiento, y la calidad de los tubérculos disminuye debido a la aparición de coloraciones indeseadas en la piel (Hesen y Kroesbergen, 1960).

- **Fisuras externas (Figura 15.a):** este tipo de daño se extiende desde el cortex hasta la piel del tubérculo. Los tejidos tienden a volverse de color marrón en vez de negro-azulado, debido probablemente a que la entrada de aire en la herida hace que el tejido se seque antes de que se complete el proceso de oxidación.
- **Reventones:** este tipo de daño se caracteriza por presentar poca o ninguna decoloración de los tejidos debido a que se trata principalmente de una separación celular. Suele ser alargado y estrecho producido a través del tubérculo, paralelo a la dirección del impacto. Este fenómeno ocurre al impactar el tubérculo sobre una superficie rígida desde una altura superior a 500 mm (Mathew y Hyde, 1997).

Daños internos

- **Fisuras internas (Figura 15.b):** este daño se produce generalmente en el tejido perimedular, pero en ocasiones se extiende a través del cortex fuera de la superficie del tubérculo. Provoca tanto daños en las células (causando la decoloración de los tejidos) como rotura celular. Estos daños se pueden dar en tubérculos expuestos a bajas temperaturas, golpeados desde una altura elevada (Mathew y Hyde, 1997) y en tubérculos muy hidratados (Thornton *et al.*, 1974).
- **Aplastamiento (Figura 15.c):** en este tipo de daño los tejidos se vuelven de un color negro-azulado además de producirse daños en las células o roturas celulares. Entre los factores que aumentan la sensibilidad al daño están la caída desde alturas bajas, las altas temperaturas durante las operaciones de manipulación y/o los bajos niveles de hidratación de los tubérculos.
- **Nudo blanco/Mancha blanca (Figura 15.d):** las lesiones del nudo blanco son similares a las del aplastamiento a excepción de la decoloración de los tejidos, ya que en este caso no se vuelven de color negro-azulado. El agua liberada en la rotura celular es absorbida por los tejidos circundantes, dejando un nudo blanco debido a la deshidratación de las células. Este tipo de daño es muy común en tubérculos inmaduros y en los tejidos con baja tensión de rotura.
- **Ennegrecimiento interno (Figura 15.e):** en este tipo de daño no se observa una rotura celular pero sí daños en las células. Normalmente, aparecen moratones de color negro-azulado en los tejidos perimedulares más que en el cortex, a las 48 horas de originarse el golpe. Este daño se produce en tubérculos blandos especialmente si el potasio es deficiente, y está asociado con los golpes desde alturas bajas (impacto a bajas velocidades) (Mathew y Hyde, 1997; Thornton *et al.*, 1974).

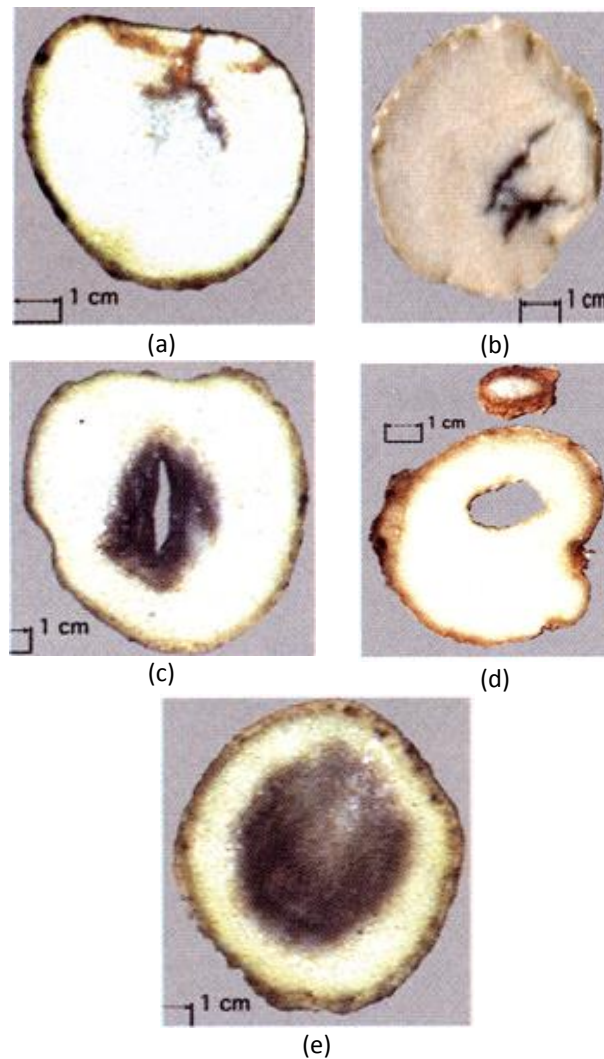


Figura 15. Tipos de daños en patatas, según la clasificación de la Universidad Estatal de Washington (Baritelle *et al.*, 2000): a) Fisura externa; b) Fisura interna; c) Aplastamiento; d) Nudo blanco/Mancha blanca; e) Ennegrecimiento interno

Las lesiones externas han pasado a ser menos importantes debido a los avances tecnológicos, mientras que el principal problema hoy en día son las lesiones internas que dañan o destruyen el tejido subcutáneo y que por lo general no son apreciables a simple vista (Peters, 1996).

2.4.2. DETECCIÓN DE LOS DAÑOS: EL FRUTO ELECTRÓNICO

Las pérdidas cuantitativas y cualitativas de frutos y tubérculos debido a los daños mecánicos, así como el incremento en los últimos años de la demanda de productos de calidad, hacen necesario el desarrollo de instrumentos capaces de evaluar los niveles de daños ocasionados por las máquinas con el objetivo de minimizar sus consecuencias.

Existen dos vías posibles para determinar los daños sufridos en frutas y verduras durante la manipulación de las mismas (Bollen, 2006): el muestreo, que consiste en hacer pasar una muestra de producto sano por los diferentes puntos de la línea a analizar, cuantificando la presencia de daños mecánicos en el mismo una vez desarrollados y visibles; o bien el empleo

de instrumentos que permitan medir las fuerzas que actúan en el proceso de manipulación y correlacionarlas con los niveles de daños producidos, basándose en la respuesta del producto tras someterlo a la fuerza medida y observar el daño sufrido.

Con este propósito se desarrollaron los frutos electrónicos, que permiten cuantificar esos daños y determinar los puntos en los que se originan (Jarén *et al.*, 2008), adaptándose a las condiciones de trabajo de las líneas.

El fruto electrónico se presenta como un fruto artificial, de tamaño y peso similar al fruto verdadero, con unidades sensibles autónomas capaces de registrar la aceleración o la presión de los golpes sufridos, además de almacenar o transmitir los datos de estos golpes para poder seguir realizando más evaluaciones (Herold *et al.*, 2005).

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes frutos electrónicos. Los primeros ensayos en los que se utilizaron este tipo de sensores se llevaron a cabo por Baganz y Ziems en 1967 (Herold *et al.*, 1996), que emplearon un acelerómetro esférico de 55 mm de diámetro conectado a un cable, capaz de medir la aceleración al producirse un impacto. Los ensayos posteriores se realizaron utilizando un nuevo dispositivo, una esfera inalámbrica para medir la presión (PMS), formada por una unidad electrónica miniaturizada en el centro de una bola de goma llena de aceite de 58 mm de diámetro, con transductor de presión y con procesamiento de señales a batería y sistema de transmisión (David, 1968; Herold y Siering, 1974 citados en (Herold *et al.*, 1996)).

El diseño de los frutos electrónicos avanzó considerablemente con la tecnología de los microprocesadores en los años 80 (Herold *et al.*, 1996). En esta década se desarrolló en Estados Unidos la esfera instrumentada IS 100 (Tennes *et al.*, 1988; Zapp *et al.*, 1990 citado en (Herold *et al.*, 1996)), por el Servicio de Investigación Agrícola del USDA junto con la Estación Experimental de Agricultura de Michigan y la Universidad Estatal de Michigan. El IS 100 consta de un acelerómetro triaxial como sensor de impactos y posee, además, un microprocesador, memoria, reloj y batería interna recargable. Permite localizar el lugar y el momento en el que se produce el impacto o la compresión, cuantifica su intensidad y es capaz de identificar la dureza del material sobre el que se ha producido la carga mecánica (Arazuri *et al.*, 2001).

Durante los años 90 se produjo un mayor desarrollo de los frutos electrónicos, que se emplearon para el control de daños provocados por las cosechadoras en campo, para la evaluación de las clasificadoras de frutos y para la selección de materiales amortiguadores utilizados en la maquinaria de recolección y post-recolección (Jarén *et al.*, 2008). El PTR 100 (Instituto de Biotecnología, Dinamarca) en 1990 y el PMS 60 (Instituto de Ingeniería Agrícola de Bornirn, Alemania) en 1993, son algunos de los frutos desarrollados en esa época.

En la actualidad, existen otras nuevas generaciones de frutos electrónicos. La mayoría de los modelos se basan en sensores triaxiales, con carcasas de formas diferentes, que miden la deceleración causada por un impacto (Van Canneyt *et al.*, 2003). Ejemplos de modelos comerciales que utilizan esta tecnología son el IRD de Techmark Inc. (USA), el PTR 200 de SM Engineering (Dinamarca) y el Smart Spud de Sensor Wireless (Canada) (Jarén *et al.*, 2008).

Herold *et al.* (2005) desarrollaron un detector de impactos miniaturizado, con un acelerómetro triaxial como sensor, que puede ser implantado en el interior de un fruto real como la patata, zanahoria o manzana. Este sensor, capaz de medir impactos de hasta 200 G's adaptándose a las propiedades específicas de cada fruto (siendo 1 G el valor de la aceleración de la gravedad ($9,8\text{m/s}^2$), unidad de medida de la intensidad del impacto), permite la transmisión y el procesamiento de datos en tiempo real.

Müller *et al.* (2008) desarrollaron un sensor de carga de tres ejes experimental con forma esférica, capaz de medir las compresiones que sufre el producto durante el proceso de embalaje. Este dispositivo, formado por tres sensores de carga de anillo, registra las fuerzas de compresión en los ejes X,Y,Z de forma independiente y permite analizar los datos en tiempo real. De esta forma, además de las compresiones, se pueden detectar los cambios en la dirección de la fuerza que experimentan los frutos al doblarse las cajas y los palets cuando las carretillas los elevan.

El último prototipo de fruto electrónico fue propuesto por Yu *et al.* (2012) con el objetivo de medir los impactos que se producen en una cosechadora rotativa de arándanos. Desarrollaron el detector de impactos con forma de baya (BIRD), una esfera instrumentada en miniatura capaz de grabar un video detallado durante el funcionamiento de la cosechadora para identificar los puntos críticos en los que se producen los impactos. Esto permite conocer cómo interaccionan las bayas con los diferentes elementos de la máquina y determinar la dureza de los materiales.

En los últimos años, se han utilizado los frutos electrónicos en numerosas investigaciones para conocer de forma precisa la interacción entre los frutos y los elementos mecánicos, con un importante objetivo: disminuir la pérdida de calidad de los productos hortofrutícolas, reduciendo el número y la intensidad de los impactos producidos en la recolección y posterior manipulación.

Hyde *et al.* (1992) evaluaron los niveles de impactos sufridos por las patatas en dos líneas de manipulación, empleando la esfera instrumentada IS. Observaron, en ambas líneas, varios puntos de transferencia que registraban impactos con valores elevados de aceleración sobre superficies duras. Indicaron que estas pruebas deben ser complementadas con ensayos de laboratorio, para determinar los daños ocasionados en las patatas cuando se someten a impactos de la misma intensidad que los registrados por los frutos, y que el empleo de materiales amortiguadores en estos puntos puede reducir de forma considerable el nivel de impactos y los daños asociados.

Molema *et al.* (2000) estudiaron el número y la intensidad de los impactos sufridos por los tubérculos de patata en las diferentes fases del proceso de manipulación, empleando el fruto electrónico IS. Registraron 340 impactos de más de 30 G's e identificaron el porcentaje de impactos para cada una de las fases, produciéndose el 11% durante la recolección, 0% en el almacenamiento, un 10% en el transporte y el 79% restante durante el embalaje. Además, observaron una buena correlación entre el número y la intensidad de los impactos y la cantidad de decoloración producida en los tejidos subcutáneos.

Arazuri *et al.* (2001) evaluaron diferentes cosechadoras de tomate utilizando el fruto electrónico IS 100, para identificar los puntos críticos en los que se producen los daños mecánicos durante la recolección. La mayoría de los impactos registrados estaban comprendidos entre 50 y 220 G's, produciéndose la mayor cantidad de daños en los elementos del sistema de corte y de los sistemas de elevación y separación de las plantas.

Expido *et al.* (2005) utilizaron dos frutos electrónicos, el PTR 200 y el IRD 400, para evaluar cuatro líneas de manipulación de patata. Observaron que ambos frutos detectaban los puntos de transferencia con mayores valores de impacto capaces de provocar daños en las patatas. Concluyeron que, a pesar de que los puntos detectados por los frutos no eran los mismos, el comportamiento de estos en los diferentes elementos de la línea era similar al de las patatas reales, y que disminuir las alturas de caída y utilizar materiales amortiguadores en los puntos de transferencia ayudaría a reducir el nivel de impactos producidos.

Bentini *et al.* (2006) estudiaron los daños producidos en una cosechadora de patata, analizando los valores de impacto registrados por una esfera instrumentada (IS), en función de la velocidad de avance y el contenido de humedad del suelo para diferentes suelos y en condiciones de trabajo distintas. Examinaron los daños presentes en los tubérculos y establecieron correlaciones entre los parámetros evaluados, los registros de los frutos electrónicos y los daños causados en las patatas.

2.4.3. PREDICCIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS DAÑOS

Las propiedades mecánicas de frutas y verduras se han utilizado en numerosas aplicaciones para la caracterización del producto y la evaluación de su calidad, además de emplearse para determinar la resistencia al daño de estos productos y en el desarrollo de sistemas de procesado mecánico (Blahovec, 2001).

En los últimos años se ha incrementado el interés de los productores, comerciantes y consumidores por la calidad de los productos agrícolas, empleándose como parámetros de diferenciación del producto variables texturales y de firmeza, ambas pertenecientes al ámbito de las propiedades mecánicas (Barreiro y Ruiz Altisent, 1996).

Al someterlas a cargas mecánicas, las frutas y verduras presentan un comportamiento viscoelástico que depende tanto de la cantidad de fuerza aplicada como de la velocidad de la carga. La medición de las propiedades viscoelásticas en estos productos requiere funciones de fuerza, deformación y tiempo (Abbott, 1999), siendo el componente viscoso de la textura importante para la determinación de la resistencia al daño en productos como la patata (Bajema *et al.*, 1998).

La textura se define como un grupo de características físicas, propiedades del alimento, que surgen a partir de los elementos estructurales del alimento, son percibidas principalmente por el sentido del tacto, están relacionadas con la deformación, desintegración y el flujo del alimento bajo el efecto de una fuerza, y son medidas de forma objetiva por funciones de masa, tiempo y distancia (Bourne, 2002).

La textura de las patatas está determinada por varios factores dependientes unos de otros: las características determinadas genéticamente del producto fresco (Ducreux *et al.*, 2008), las propiedades estructurales y bioquímicas de los tejidos del tubérculo, la composición química (contenido de sólidos secos, densidad relativa, almidón, amilosa, azúcares, proteínas y nitrógeno total) y tanto las condiciones agronómicas como de almacenamiento (Kaur *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2009).

La firmeza es la consistencia de los frutos, determinada tradicionalmente como la fuerza necesaria para deformar la superficie de un fruto con el pulgar. La firmeza es un atributo textural importante en frutas y verduras, que se utiliza para la caracterización de los frutos en cuanto a su calidad organoléptica, su estado de madurez y su resistencia a daños mecánicos durante la recolección, manipulación y transporte hasta el consumidor. Puede determinarse a través de distintas magnitudes, como la resistencia a rotura, el módulo de elasticidad, la indeformabilidad o cualquier otra magnitud proporcional a las anteriores, aunque el método normalizado de determinación de la firmeza es a través de una medida de resistencia (ensayo de penetración Magness-Taylor) (Barreiro y Ruiz Altisent, 1996).

La calidad del producto tiene que ser determinada mediante la realización de pruebas instrumentales fiables, en las que se incluyen los ensayos mecánicos. La mayoría de estas pruebas mecánicas implican determinar la relación entre la fuerza mecánica a la que se somete un producto y los cambios producidos en la dimensión y la forma del mismo, es decir la deformación del producto (Blahovec, 2001). Los ensayos mecánicos de textura incluyen las pruebas habituales de penetración, punción, compresión y corte, así como los ensayos de fluencia, impacto, pruebas acústicas y de ultrasonidos, tendiendo cada vez más al desarrollo de métodos no destructivos (Abbott, 1999).

Ensayos de compresión

La firmeza de los productos hortícolas puede medirse a velocidades de carga relativamente lentas mediante ensayos de compresión o penetración, utilizando varias sondas a diferentes niveles de fuerza o deformación dependiendo del propósito de la medición y de cómo estén definidos los atributos de calidad. Estos ensayos, típicos de instrumentos como el medidor de firmeza de fruta Magness-Taylor y las máquinas universales de ensayos que miden la relación (F/D), son considerados métodos instrumentales cuasi-estáticos (Abbott, 1999).

Los ensayos de compresión se han utilizado ampliamente para evaluar el comportamiento mecánico de los tejidos en patata y manzana, además de emplearse para estudiar la velocidad de deformación y su efecto en las características reológicas o mecánicas (Alvarez *et al.*, 2002).

La base común de todos los ensayos de compresión cuasi-estáticos es la curva de deformación obtenida a una velocidad de deformación constante, con cuatro importantes partes características: la parte inicial (pre-Hooke o pre-Hertz), la parte de Hooke o Hertz cuasi-elástica, la parte del punto de biofluencia (superado el límite elástico), y la parte de deformación irreversible tras la zona elástica (Blahovec, 2001).

Existen dos tipos principales de ensayos de compresión: la compresión uniaxial, en la que la muestra es comprimida en una única dirección utilizando un plato de diámetro superior a la muestra, y la compresión total, que comprime la muestra en tres dimensiones por medio generalmente de presión hidráulica. Debido probablemente a la lentitud de la prueba y a la dificultad de realizarla bajo condiciones en las que la fuerza es aplicada por medio de presión hidráulica, los ensayos de compresión total rara vez se utilizan en pruebas con alimentos (Bourne, 2002).

Los ensayos de compresión uniaxial, ya sea mediante el contacto de dos placas paralelas o por el contacto de una sola placa con la muestra, son ampliamente utilizados para los alimentos sólidos, y generalmente se realizan mediante el uso de máquinas universales de ensayos. Para este tipo de alimentos, las pruebas de compresión uniaxial se clasifican en destructivas o no destructivas, en función de si la fuerza de compresión aplicada sobre la muestra se incrementa o se mantiene baja, asegurando la aparición o no de un daño irreversible en la muestra respectivamente (Bourne, 2002).

Hace aproximadamente 50 años, un grupo del General Foods Corporation Technical Center desarrolló el procedimiento de análisis del perfil de textura instrumental (TPA) mediante el uso de un texturómetro universal, que permitía analizar una serie de parámetros texturales (dureza, fragilidad, cohesión, adherencia, elasticidad, etc.) a través de la curva de fuerza-tiempo obtenida en una sola prueba por medio de una doble compresión de la muestra (Friedman *et al.*, 1963). En la actualidad, los análisis del perfil de textura se realizan mediante el uso de máquinas universales de ensayos, como el Instron o el Analizador de Textura TA-XT2, con algunas modificaciones con respecto al TPA inicial (Bourne, 2002).

Arazuri *et al.* (2007) evaluaron la influencia de diferentes máquinas cosechadoras en las propiedades de firmeza del tomate mediante un analizador de textura TA-XT2 para las pruebas de compresión, resistencia a la penetración y compresión destructiva, realizándose esta última, además, para evaluar el comportamiento de los tomates durante el transporte.

Esta misma instrumentación ha sido utilizada por otros muchos investigadores para medir la firmeza en manzanas, melocotones y nectarinas (Arana *et al.*, 2007), así como en patata (Salar, 2009).

Ensayos de impacto

Durante mucho tiempo, diversos grupos de investigación han estudiado en profundidad las relaciones existentes entre los parámetros que caracterizan el impacto mecánico y el estado de firmeza de algunos frutos (Diezma *et al.*, 2001).

Varios investigadores han descrito el impacto como un fenómeno elasto-plástico, lo que supone que el fruto se comporta parcialmente como elástico y parcialmente como plástico. Este comportamiento está ligado a la composición de los tejidos: células de paredes resistentes, fundamentalmente elásticas, y citoplasma y vacuolas de naturaleza plástica o viscosa (Ruiz Altisent, 1988).

En relación con estas características, Bowden y Tabor (1954) dividieron el impacto producido al chocar dos cuerpos en cuatro fases (Mohsenin, 1986):

1. Deformación elástica inicial, durante la cual la región de contacto se deforma y se recupera totalmente sin deformación residual. El momento en que se produce el impacto, las presiones medias y la deformación para esta fase pueden determinarse utilizando las ecuaciones basadas en la teoría de Hertz.
2. Inicio de la deformación plástica, durante la cual la presión media excede la presión de rotura del material y la deformación resultante no se recupera completamente. Esta condición se produce a energías de impacto muy pequeñas.
3. Deformación completamente plástica, durante la cual la deformación pasa de elástico-plástica a totalmente plástica hasta que la presión cae por debajo de la presión de rotura.
4. Rebote elástico, durante el cual se produce una liberación de las tensiones elásticas almacenadas en ambos cuerpos.

Los desarrollos de dispositivos para el estudio del impacto en frutas, han seguido básicamente dos líneas de trabajo con dos métodos de medir fuerza y aceleración (Diezma *et al.*, 2001):

- Sistemas que usan un transductor de fuerza (como objeto impactado o como impactante) para medir la fuerza durante el impacto y otro dispositivo, generalmente electroóptico, para medir deformación. Cuando el objeto impactado es una superficie rígida en la que se encuentra el sensor, el fruto se deja caer desde una altura determinada sobre dicha superficie.
- Sistemas en los que un cuerpo de masa conocida golpea la fruta en un punto prefijado. Un acelerómetro montado en el objeto impactante mide la aceleración negativa durante el tiempo del impacto. De esta forma, la fuerza aplicada en cada instante se obtiene del producto de la masa por la aceleración, y al integrar dos veces la curva aceleración vs. tiempo se consigue la curva de deformación.

Entre los métodos instrumentales utilizados para los ensayos de impacto se encuentran la caída libre de frutos sobre superficies duras o acolchadas, el impacto producido por un péndulo simple o compuesto sobre el material, o el impacto de una masa impactante (cilindro metálico, esfera metálica, etc.) sobre el fruto como en el caso de los impactadores verticales (de caída libre) y laterales.

Para clasificar dos variedades de manzanas ("Golden Delicious" y "Starking") y peras ("Blanquilla" y "Decana del Congreso") en función de la firmeza de los frutos, Jarén y García-Pardo (2002) utilizaron un impactador vertical y otros métodos no destructivos y destructivos para medir la madurez durante varias semanas, conforme se incrementaba el grado de madurez de los frutos. No observaron diferencias significativas entre los parámetros de impacto medidos con ambos métodos (destructivos y no destructivos), obteniendo un porcentaje de bien clasificados del 100%, aproximadamente, al reducir el número de clases iniciales de firmeza para cada variedad de fruta estudiada a 3 (cada día de medida se definió como una clase, de tal forma que la pera Blanquilla tenía 5 clases, la Decana del Congreso 8, y las dos variedades de manzana 10 clases cada una). Concluyeron que debido a la precisión del

método de impacto no destructivo, en combinación con el análisis discriminante de los datos, podría ser implantado en los sistemas de clasificación de las líneas de manipulación.

Gracia y Traver (2007) evaluaron la susceptibilidad al daño mecánico en patatas tempranas bajo ciertas condiciones de cosecha (influencia del desmatado previo y temperatura ambiente) mediante diferentes ensayos mecánicos que simulan las situaciones a las que se somete el producto tanto en la recolección mecánica, como en su manipulación durante el transporte, almacenamiento y confección, entre los que se encuentra el de impacto por caída libre. Observaron que los tubérculos con un buen desarrollo de la piel externa (que puede lograrse con la eliminación de la parte aérea 10 días antes de la recolección) presentan mayor resistencia a los daños mecánicos, y que cuanto menor es la temperatura (en el rango ensayado 10-25°C) el porcentaje de daños ocasionados aumenta ligeramente.

Salar *et al.* (2009) utilizaron el impactador vertical para evaluar el comportamiento de dos modelos distintos de cosechadoras de patata, mediante el estudio del efecto que tienen sobre la firmeza de los tubérculos durante la recolección. Observaron diferentes comportamientos en ambas máquinas, al mostrar una de ellas una mayor influencia sobre la textura de los tubérculos, dándose una pérdida de firmeza mayor.

Los resultados de estudios con diferentes especies y variedades de fruta han demostrado que las técnicas en las que los frutos impactan contra un sensor de fuerza y miden la fuerza en función del tiempo son más susceptibles a los cambios de peso y radio de curvatura de los frutos, obteniendo incluso un enmascaramiento de los datos referidos a la firmeza. Esto es debido a que la fuerza de impacto es función de la masa y del radio de curvatura, la velocidad está limitada por la velocidad del fruto en caída libre y el punto de impacto no se puede controlar (Diezma *et al.*, 2001).

2.5. TECNOLOGÍA NIRS

2.5.1. BASES TEÓRICAS

La espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS) es una técnica no invasiva que forma parte, junto con otras técnicas espectroscópicas como el ultravioleta-visible y el infrarrojo convencional, del campo de estudio de la espectroscopía molecular, la cual estudia la interacción de la radiación electromagnética con la materia (Heise y Winzen, 2002).

El infrarrojo cercano (NIR) es la región del espectro electromagnético que cubre el rango de longitudes de onda de los 780 a los 2500 nm, comprendida entre las regiones del visible y el infrarrojo medio (MIR) (Siesler, 2002).

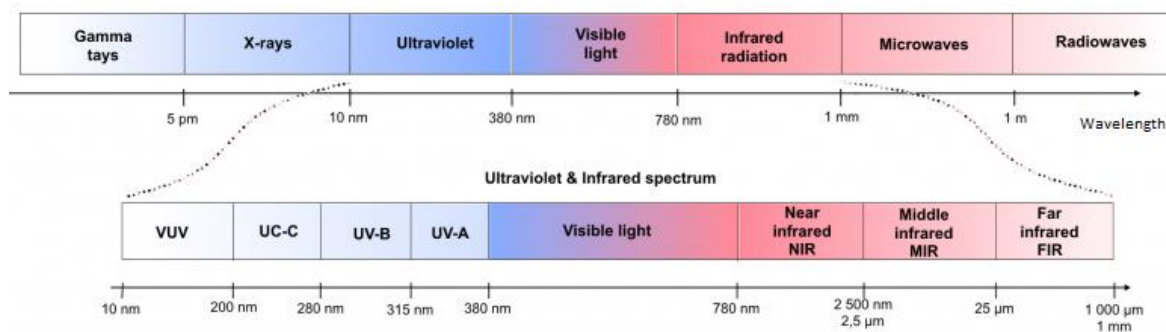


Figura 16. Esquema del espectro electromagnético

En una molécula, los átomos no ocupan posiciones fijas sino que se encuentran en continuo movimiento y vibran dentro de un determinado espacio. Para la realización de estos cambios de posición de los elementos de una molécula se requiere la absorción de cierta cantidad de energía que oscila alrededor de una frecuencia de 1013 Hz, la cual corresponde a la región espectral del infrarrojo cercano (NIR) (Skoog y Leary, 1996).

La tecnología NIRS consiste en la irradiación de una muestra con una o varias bandas de longitud de onda comprendidas entre 780 y 2500 nm, y posterior medición de la radiación reflejada o transmitida. Cuando se irradia la muestra la radiación incidente puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Al penetrar la radiación en la muestra, la luz es absorbida selectivamente de acuerdo con las frecuencias de vibración específicas de las moléculas presentes, dando como resultado un espectro NIR que depende de la composición química y de los parámetros físicos de la muestra (Nicolai *et al.*, 2007; Skoog y Leary, 1996). Estos espectros NIR se caracterizan por la superposición de bandas de absorción que se corresponden con sobretonos y combinaciones de modos de vibración, en los que están implicados los enlaces químicos C-H, O-H y N-H (Siesler, 2002).

La interacción entre energía y materia sigue la ley de Beer-Lambert, según la cual la absorbancia a cualquier longitud de onda es proporcional a la concentración de moléculas presentes en la trayectoria de radiación capaces de absorber la radiación incidente (Siesler, 2002). De esta forma, se puede conocer la concentración de determinadas sustancias presentes en la muestra a partir de los valores de absorbancia o reflectancia obtenidos.

2.5.2. INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación utilizada en espectroscopía del infrarrojo cercano no es muy diferente a la que se utiliza en el visible y en las regiones del infrarrojo, empleándose espectrofotómetros similares en todas las longitudes de onda de la región NIR, con algunas modificaciones para las de mayor longitud (> 2μm) (Kawata, 2002a).

Existen diferentes formas de medición con la tecnología NIRS, dentro de las cuales se encuentran las medidas por reflectancia, transmitancia y transreflectancia (Bergera *et al.*, 2006).

- Reflectancia, es el efecto producido cuando un haz de luz incide sobre la superficie de un cuerpo, donde una parte es absorbida y el resto lo devuelve al medio en mayor o menor proporción en función del tipo de material sobre el que incida la luz.
- Transmitancia, es la parte del total de haz de luz monocromática que incide sobre un cuerpo que no es absorbida, sino que atraviesa el mismo.
- Transflectancia, es el efecto combinado de reflectancia y transmitancia en el que parte de la luz incidente es reflejada en la muestra y otra parte la atraviesa, para ser reflejada por un material colocado en la cara opuesta de la muestra y recogida por el detector.

Los equipos empleados para esta técnica suelen clasificarse en función del dispositivo utilizado para la selección de longitudes de onda, pudiendo ser sistemas de filtros, matriz de diodos, monocromadores de rastreo o instrumentos de transformada de Fourier. A pesar de las distintas clasificaciones de los equipos NIRS, los elementos que los componen son comunes para todos ellos.

Un espectrofotómetro NIR está formado por las siguientes partes (Bergera *et al.*, 2006; Kawata, 2002b):

- Fuente de radiación (Lámpara): La fuente de radiación infrarroja más utilizada es la lámpara halógena de tungsteno, que proporciona una luz espectral continua en la región de los 2500 nm. Otras fuentes de radiación que se utilizan son los LEDs (*Light Emitting Diodes*), que pueden llegar a emitir hasta los 1600 nm.
- Red de difracción: Se trata de una lente holográfica cóncava que descompone la luz policromática en longitudes de onda discretas. Esta lente puede ser móvil, en el caso de los sistemas de filtros y los monocromadores, o estacionaria para la matriz de diodos y los filtros optoacústicos ajustables (AOFT).
- Filtros: Son elementos que eliminan la llegada de longitudes de onda no deseadas al detector, procedente de la difracción. Estos filtros van sincronizados con el movimiento de la red de difracción en caso de que éste exista.
- Porta muestras: En ellos se colocan las celdas o cubetas que integran la muestra correspondiente. Existen variedad de módulos para diferentes tipos de análisis (reflectancia, transmitancia y transflectancia).
- Detector: Sensor que detecta la radiación NIR. Uno de los más utilizados es el de sulfuro de plomo (PbS), debido a la alta sensibilidad y a la amplitud de rango (900-3300 nm) que presenta. Otros detectores utilizados son, el detector InGaAs para longitudes comprendidas entre 900-1700 nm, y el detector de silicio para longitudes de 400-1100 nm.
- Elementos ópticos: Como la fibra óptica que transporta la radiación NIR directamente al contenedor de la muestra, u otros componentes como lentes, colimadores o esferas integradoras.

2.5.3. QUIMIOMETRÍA

La quimiometría se define como la disciplina química que emplea métodos matemáticos y estadísticos, así como la lógica formal, para diseñar o seleccionar procedimientos experimentales óptimos, para proporcionar la máxima información química relevante mediante el análisis de los datos químicos obtenidos, y para obtener conocimientos a cerca de los sistemas químicos (Massart *et al.*, 1997).

El espectro NIR de frutas y verduras está dominado por bandas de absorción de agua, debido a que el agua es el componente químico más importante en la mayoría de estos productos. Además, el espectro NIR se compone fundamentalmente de un conjunto de sobretonos y combinaciones de bandas, que junto con la compleja composición química de frutas y verduras hacen difícil su interpretación. Por último, el espectro puede complicarse por el efecto de la dispersión de las longitudes de onda, la heterogeneidad de los tejidos, el ruido instrumental, efectos ambientales y otras fuentes de variabilidad. Como consecuencia, es difícil asignar bandas de absorción específicas a grupos funcionales específicos y mucho menos a los componentes químicos de la muestra. Para poder extraer información de los espectros NIR, se requieren técnicas estadísticas multivariantes avanzadas (Nicolai *et al.*, 2007) para desarrollar ecuaciones de calibración que relacionen los datos espectrales con los parámetros de calidad, medidos a través de un método estándar de laboratorio (Peiris *et al.*, 1999).

Una parte importante de la quimiometría es, por tanto, el análisis de datos multivariante, esencial para los ensayos cuantitativos y cualitativos basados en la espectroscopía NIR (Heise y Winzen, 2002). El análisis multivariante podría definirse como los diferentes métodos estadísticos, matemáticos o gráficos, que se emplean en el análisis de datos considerando varias variables de forma simultánea (Martens y Martens, 2001; Naes *et al.*, 2002a). En el caso de la tecnología NIRS, el análisis multivariante se utiliza para estimar cualquier propiedad de la muestra (físico-química, fundamentalmente) a partir de múltiples variables espectrales (valores de absorbancia a diferentes longitudes de onda).

Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo en espectroscopía NIR consiste en estimar la concentración de una determinada sustancia en la muestra, relacionando matemáticamente los valores de absorbancia del espectro NIR con la concentración de dicha sustancia, determinada mediante métodos de referencia. Este proceso se conoce con el nombre de etapa de calibración, denominando a la relación matemática desarrollada ecuación de calibración y al conjunto de muestras de composición conocida grupo de calibración. Una vez establecida la ecuación de calibración, es posible predecir la composición físico-química de muestras con características similares a las del grupo de calibración (Shenk y Westerhaus, 1995, 1996; Williams y Sobering, 1996).

El desarrollo de ecuaciones de calibración globales sólidas, es decir, ecuaciones que puedan ser aplicadas en prácticamente la totalidad de las muestras y que representen todas las formas de variación esperadas durante un análisis rutinario, requiere el seguimiento de una serie de pasos que se indican a continuación (Shenk y Westerhaus, 1996).

Una fase importante en el desarrollo de una ecuación de calibración NIRS, después de haber obtenido el espectro de absorción a partir del escaneado de la muestra, es la selección de las muestras que van a constituir el grupo de calibración. Teniendo en cuenta que el número de muestras disponibles debe ser suficiente para el desarrollo y posterior validación del modelo, en general, cuantas más muestras conformen el grupo de calibración, mayor capacidad de predicción presentará la ecuación. Sin embargo, dado que las muestras han de ser analizadas mediante métodos de referencia para obtener los valores de los parámetros físico-químicos de las mismas, y estos suelen ser lentos y costosos, el número de muestras a emplear se ve limitado. Por otro lado, otro aspecto importante en la selección de muestras es la variabilidad, tanto espectral como química, que estas presentan (Naes *et al.*, 2002e; Shenk y Westerhaus, 1996).

Como se ha comentado anteriormente, para el desarrollo de ecuaciones de calibración globales, las muestras han de ser representativas del producto a analizar abarcando, además de la variabilidad referente a la composición de las muestras, toda fuente de variación que es posible esperar en un análisis rutinario. A los grupos de muestras que cumplen estas características se les suele denominar librerías espectrales de un producto (Shenk y Westerhaus, 1996).

En las últimas décadas, se han propuesto diversos métodos de selección de muestras para constituir el grupo de calibración (Isaksson y Næs, 1990; Næs y Isaksson, 1989), incorporando incluso, en programas de tratamiento quimiométrico de espectros NIR, herramientas para la identificación y selección de muestras representativas de una librería espectral. La mayoría de estas herramientas se basan en la realización de un análisis de componentes principales (PCA), seguido del cálculo de distancias entre muestras (espectros) en un espacio n-dimensional a través generalmente de la distancia de Mahalanobis (Shenk y Westerhaus, 1996).

Debido a la complejidad de las muestras utilizadas en la espectroscopía NIR actual, existen numerosas fuentes de variación espectral que dan como resultado modelos poco fiables:

- Interacciones entre compuestos químicos
- Dispersión de la luz en muestras sólidas o en líquidos con partículas en suspensión
- Escasa reproducibilidad en el proceso de medida (variaciones en el paso de la luz)
- Distorsiones espectrales debidas a la instrumentación: variaciones de la línea base, cambios en las lecturas a determinadas longitudes de onda, no linealidad de los detectores o ruido instrumental

Por ello, para reducir, eliminar o normalizar el efecto de estas fuentes de error sin influir en la información espectral necesaria para la predicción, suelen aplicarse pretratamientos espectrales a los datos (Heise y Winzen, 2002).

Las técnicas de pretratamiento espectral más utilizadas son (Heise y Winzen, 2002; Naes *et al.*, 2002d; Nicolai *et al.*, 2007):

- Promediado de espectros: Consiste en reducir el número de longitudes de onda, o promediar las señales del espectro, para mejorar el ratio señal/ruido.
- Centrado (*Mean Center*): Es un pretratamiento habitual, previo al desarrollo del modelo de calibración, que consiste en centrar los datos restando la media a cada variable. De esta forma, todos los resultados son interpretados en términos de variación alrededor de la media.
- Suavizado: Las técnicas de suavizado se utilizan para reducir el ruido aleatorio de los espectros. Estas técnicas utilizan filtros de suavizado en el intervalo de frecuencia, aplicando a una ventana espectral de puntos un método para promediar los valores de la señal. Entre los métodos más empleados están el de Savitzky-Golay y el de la transformada de Fourier (Amigo, 2010).
- Derivadas: La derivación de los datos espectrales se utiliza para eliminar el solapamiento de bandas y las variaciones de la línea base, además de emplearse para extraer información adicional del espectro. La más utilizada en espectroscopía es la segunda derivada, que corrige los efectos aditivos y multiplicativos de los espectros. Los métodos más utilizados para el cálculo de derivadas son el método de diferenciación de Norris y el método de Savitzky-Golay.
- MSC (*Multiplicative Scatter Correction*): Es una técnica de normalización utilizada para compensar los efectos multiplicativos y aditivos (cambios de la línea base) en los datos espectrales, inducidos por efecto de la dispersión. Intenta eliminar estos efectos desplazando y adaptando cada espectro a un espectro objetivo dado, mediante una regresión lineal. En la práctica, este espectro objetivo se corresponde con el espectro medio del grupo de calibración. El EMSC, es una extensión del MSC que permite compensar también las interferencias producidas por los efectos químicos, incorporando espectros conocidos de las sustancias implicadas.
- SNV (*Standard Normal Variate*): Esta técnica centra y escala los espectros de forma individual, obteniendo efectos muy similares a los del MSC. Cada espectro se centra en torno a cero restando la media y después se divide cada valor de la señal por la desviación estándar de todo el espectro.
- *Detrending*: Consiste en aplicar un polinomio de bajo grado en todos los puntos del espectro y después restar del espectro la curva resultante, para corregir las variaciones de la línea base. Este método suele utilizarse junto con el SNV.

Una vez seleccionadas las muestras de calibración, analizadas mediante el método de referencia y NIRS, y las variables espectrales a considerar, la siguiente fase es el cálculo en sí de la ecuación de calibración que relacione ambos datos. Para ello existen diferentes métodos de regresión (Martens y Naes, 1989; Naes *et al.*, 2002a; Nicolai *et al.*, 2007), siendo los más utilizados en las aplicaciones cuantitativas NIRS, la regresión lineal múltiple (MLR), la regresión por componentes principales (PCR) y la regresión mediante mínimos cuadrados parciales (PLS).

- MLR: es la técnica multivariante más sencilla que calcula la relación lineal entre la señal espectral y la concentración de una sustancia, aplicando el método de mínimos cuadrados, a partir de un pequeño número de variables espectrales. Dichas longitudes de onda, seleccionadas mediante un test F de entre todo el espectro NIR, son aquellas que presentan una mayor correlación entre el valor de absorbancia a una longitud de onda determinada y el dato de composición química de cada muestra. Los métodos MLR presentan una alta multicolinealidad de los espectros y conducen fácilmente al sobreajuste y a la pérdida de robustez de los modelos de calibración.
- PCR: es un método de regresión que consta de dos etapas. Primero reduce la matriz de datos espectrales mediante un análisis de componentes principales (PCA), obteniendo nuevas variables ortogonales, conocidas como componentes principales (PCs), que intentan explicar el mayor porcentaje de varianza en el conjunto de datos espectrales (Mark, 1992). Después, desarrolla una regresión lineal entre las variables espectrales y los datos de referencia utilizando un pequeño número de PCs.
- PLS: es un método similar al PCR ya que obtiene nuevas variables espectrales (ortogonales), combinaciones lineales de los datos originales, para el desarrollo del modelo de regresión. En este caso, cada una de las variables espectrales, denominadas variables latentes (LV), se obtiene considerando la máxima covarianza entre los datos espectrales y los datos de referencia de los parámetros a determinar. El método de regresión para una sola variable de la matriz de datos de referencia (algoritmo PLS1) se puede ampliar para predecir simultáneamente varios parámetros, recibiendo el nombre de PLS2.

Durante el desarrollo de la ecuación de calibración NIRS, siempre se observan determinadas muestras que, por diversos motivos (errores en la información espectral y/o en los datos de referencia), presentan un comportamiento diferente al resto de muestras del grupo de calibración. Estas muestras reciben el nombre de anómalas (*outliers*) y pueden influir negativamente en los resultados del modelo. Por ello, la detección, interpretación y posible eliminación de estos datos anómalos es una fase importante en el desarrollo del mismo (Naes *et al.*, 2002b).

Una vez calculada la ecuación de calibración mediante alguno de los métodos de regresión existentes, es esencial evaluar la capacidad del modelo de predecir nuevas muestras. Para ello existen diferentes procedimientos, denominando a esta fase etapa de validación. En la validación externa, se utiliza un conjunto de muestras independientes a las empleadas en la calibración (grupo de validación) para validar la capacidad predictiva del modelo. Estas muestras, de composición conocida y representativas tanto del grupo de calibración como de las futuras muestras a analizar, permiten evaluar cómo se comporta el modelo propuesto en el cálculo de concentraciones de muestras distintas. En la validación interna, el conjunto de datos se divide en dos grupos, el grupo de calibración y el de validación. De esta manera, el modelo de calibración se construye utilizando el grupo de calibración, y los residuales de predicción se calculan aplicando al grupo de validación el modelo desarrollado. La validación cruzada (Stone, 1974), es una técnica de validación basada únicamente en los datos empleados en la etapa de calibración. Para ello, se van eliminando sucesivamente muestras (una por una) del grupo de

calibración, que después se utilizan para validar la ecuación desarrollada a partir del resto de muestras del grupo. Este proceso se repite hasta lograr que todas las muestras hayan sido utilizadas una vez en la validación del modelo, y al final se estima la varianza de todos los residuales de predicción calculados. Una alternativa a la validación cruzada, denominada validación cruzada múltiple, es eliminar un conjunto bien definido de muestras (segmento) del grupo de calibración en vez de muestras individuales (Nicolăi *et al.*, 2007).

Análisis Cualitativo

A diferencia de las concentraciones en el análisis cuantitativo, las propiedades cualitativas de una muestra relacionadas con las variaciones espectrales no pueden expresarse como variables continuas, sino que poseen valores discretos que pueden representar, por ejemplo, la identidad del producto o la buena/mala calidad del mismo.

El análisis cualitativo en espectroscopía NIR consiste en la identificación y clasificación de muestras, mediante la comparación entre los espectros de un grupo de muestras de propiedades conocidas con los espectros de las muestras desconocidas. Los métodos quimiométricos empleados para el agrupamiento y clasificación de características espectrales de muestras, materiales o compuestos se subdividen en dos grupos: supervisados y no supervisados. Ambos se diferencian en el nivel de información previa disponible de las muestras para su agrupamiento (Heise y Winzen, 2002).

En los métodos no supervisados, la información previa disponible acerca de la existencia de grupos en las muestras analizadas es escasa o nula. El objetivo de esta clase de métodos es encontrar o identificar tendencias al agrupamiento de las muestras, sin utilizar ningún tipo de información adicional a los datos espectrales. Por ello, estos métodos son a menudo útiles en las primeras etapas de una investigación, para la exploración de los datos. Entre los métodos más utilizados están: el análisis de componentes principales (PCA); los métodos de análisis cluster jerárquicos, que determinan la similitud entre muestras a través de la medida de la distancia entre las mismas; y los métodos cluster de partición (no jerárquicos) que pretenden establecer un criterio óptimo para medir el grado de agrupamiento en los datos (Naes *et al.*, 2002c). Existen diferentes estadísticos para expresar la distancia entre muestras como son la distancia de Minkowski, la Euclídea, de Manhattan o de Mahalanobis, entre otras (Otto, 1999).

Por el contrario, los métodos supervisados sí disponen de información acerca de los grupos existentes en el conjunto de muestras. Este tipo de métodos se utilizan principalmente con el objetivo de generar reglas de clasificación para un número predeterminado de subgrupos de muestras. Para ello, se parte de un conjunto de muestras, denominado grupo de entrenamiento, del que se dispone tanto de los datos espectrales NIR como de la información de la variable categórica (origen, variedad, procedencia), estableciéndose una función que correlacione ambos tipos de datos. Una vez generadas las reglas de clasificación, estas se utilizan para asignar nuevas y desconocidas muestras a aquellos subgrupos con los que presenten mayor semejanza en términos estadísticos.

Otra aplicación importante de los métodos supervisados es ayudar en la interpretación de las diferencias existentes entre los grupos de muestras. Los métodos de clasificación supervisados más empleados son el análisis discriminante lineal (LDA) y cuadrático (QDA), el análisis discriminante canónico (o análisis discriminante lineal de Fisher), el análisis basado en componentes principales, el análisis discriminante mediante el método PLS (PLS-DA), el análisis SIMCA (*Soft Independent Modelling of Class Analogies*), el análisis KNN (*K nearest neighbours*) o el análisis mediante redes neuronales artificiales (ANN) (Heise y Winzen, 2002; Naes *et al.*, 2002c).

2.5.4. APLICACIONES NIRS EN PATATA

Una de las primeras aplicaciones de la tecnología NIRS en la patata fue en la medición del contenido de humedad en patatas fritas de bolsa (en inglés crisps). En 1988, McDermott consiguió buenos resultados experimentales, obteniendo un coeficiente de correlación (R) de 0,95, indicativo de una relación lineal muy buena entre las dos variables de estudio ($R=1$ indica una correlación perfecta, mientras $R=0$ indica que no existe correlación), y un error estándar de estimación de 0,15.

Desde entonces se han llevado a cabo estudios similares en diferentes muestras de patatas fritas comerciales. Los resultados obtenidos coinciden con los del estudio anterior, con valores entre 0,20 y 0,26 para el error estándar de validación (SEV) y entre 0,95 y 0,98 en el caso del coeficiente de correlación, cuando se aplica el modelo de regresión estadístico PLS (Ni *et al.*, 2011; Shiroma y Rodriguez-Saona, 2009).

Sin embargo, Ni *et al.* (2011) obtuvieron mejores resultados en la predicción de la humedad utilizando los métodos de máquinas de soporte vectorial por mínimos cuadrados (LS-SVM) y de mínimos cuadrados parciales Kernel (KPLS). Los coeficientes de correlación fueron de 0,99 y 0,98, con valores de la raíz del error cuadrático medio de validación (RMSEV) de 0,07 y 0,10, para el LS-SVM y KPLS respectivamente. Basándose en los resultados obtenidos, llegaron a la conclusión de que era posible determinar el contenido de humedad de las patatas fritas de una forma más rápida y precisa.

Algunos autores han utilizado la tecnología NIRS como el único método de estimación del contenido de humedad de patatas en los análisis rutinarios en las líneas. En 2007, Broothaerts *et al.* emplearon la técnica NIRS para determinar el contenido de agua en muestras de patata liofilizada. La investigación se centró en el desarrollo de un material de referencia certificado para las patatas modificadas genéticamente con alteración en el contenido de almidón, determinando el contenido de agua tanto en las muestras de patata modificadas y no modificadas genéticamente mediante el uso de un espectrofotómetro NIR optoacústico (AOFT-NIR) integrado en línea en su instrumentación. Los datos NIR fueron evaluados mediante un modelo de regresión PLS1 basado en calibraciones de carne previamente evaluados por Kestens *et al.* (2008), capaz de predecir el contenido de agua de las muestras, obteniendo unos resultados coherentes.

Otros autores se han centrado en la determinación de materia seca y almidón en patatas. La concentración de materia seca es un indicador útil de la calidad de la patata, ya que contiene información sobre el contenido de agua y almidón (Subedi y Walsh, 2009). Un gran porcentaje del contenido de materia seca en la patata se encuentra en forma de almidón y es considerado un constituyente importante de este alimento ya que la calidad final de los productos de patata está directamente relacionada con este componente (Haase, 2003).

En la década de los 80 la medición de la densidad específica fue el mejor método práctico y no destructivo de estimación del contenido de materia seca en patatas. A pesar de la alta correlación existente entre la materia seca y la densidad específica (Wilson y Lindsay, 1969), era necesario el desarrollo de una técnica no destructiva mucho más rápida y precisa. Por ello, a partir de esta década durante los años 90 y en la actualidad algunos autores como Haase (Haase, 2003), Hartmann y Büning-Pfaue (Hartmann y Büning-Pfaue, 1998), Brunt y Drost (Brunt y Drost, 2003) han estudiado la correlación entre el espectro y el contenido tanto de materia seca como de almidón en estos tubérculos. El método más comúnmente utilizado para establecer esta correlación fue la combinación de los datos NIRS con el modelo de regresión estadístico PLS.

Diversos autores han obtenido coeficientes de determinación (R^2) así como errores estándar de predicción (SEP), con valores que oscilan entre 0,81 y 0,99 y de 0,19 a 1,64 respectivamente, para el contenido de materia seca y de almidón en patata determinados mediante tecnología NIRS. Para ello, estudiaron una amplia gama de variedades de patata con diferentes formas de presentación de la muestra: intacta, triturada, liofilizada, etc.; utilizando, además, diferentes regiones de longitud de onda, que van de 750 a 950, de 800 a 1000, de 1100 a 2500, de 850 a 2500, de 1000 a 2500 nm o incluyendo la región visible de 400 a 2500 y de 460 a 1040 nm, para desarrollar los modelos de calibración. Se sabe que el almidón posee bandas de absorción en los 1200, 1700, 1720 y 1780 nm (Osborne *et al.*, 1993). Debido a esto hecho, el rango de valores del SEP obtenido es muy amplio y por consiguiente, es difícil establecer tanto la forma de presentación de la muestra como la longitud de onda específica para predecir el contenido de materia seca y de almidón. Sin embargo, parece que los valores más bajos del SEP para ambos componentes se obtienen cuando la muestra es triturada y homogeneizada y se utiliza un rango de longitudes de onda entre los 1100 y 2500 nm (Kommer *et al.*, 2010; Brunt y Drost, 2003; Brunt *et al.*, 2010; Fernández-Ahumada *et al.*, 2006; Haase, 2003, 2006, 2011; Hartmann y Büning-Pfaue, 1998; Scanlon *et al.*, 1997; Subedi y Walsh, 2009). El grado de predicción del contenido de materia seca fue alto para las patatas fritas (crisps) (raíz del error cuadrático medio de la validación cruzada RMSECV: 0,84), donde el porcentaje de este componente fue significativamente superior al de las muestras de patata intactas y trituradas (Pedreschi *et al.*, 2010).

Otros autores se han centrado en el estudio de la región óptima del tubérculo de patata para ser escaneada utilizando la tecnología NIRS, con el fin de predecir el contenido de materia seca en todo el tubérculo. Como resultado, Peiris *et al.* (1999) indicaron que el contenido de materia seca en las patatas era mayor en las zonas hacia la superficie del tubérculo que en el centro. Este resultado coincide con el obtenido por Scalón *et al.* (1997) donde los valores más estrechamente correlacionados fueron los de fuera de la sección central del tubérculo.

El contenido de proteína en la patata es considerablemente inferior al contenido de materia seca y de almidón (0,5-2%), por lo que parece difícil la predicción de este componente mediante el uso de la tecnología NIRS (López *et al.*, 2013).

En los últimos años se han llevado a cabo varios estudios con el fin de predecir el contenido de proteína en las patatas, considerando como parámetros de medida la proteína bruta, la proteína recuperable y la proteína coagulante, en los rangos de longitud de onda de 400 a 2500, de 850 a 2500 y de 1100 a 2500 nm. Los mejores resultados se obtuvieron en la estimación de la proteína coagulante con valores de la raíz del error cuadrático medio de predicción (RMSEP) entre 0,06 y 0,16, mientras que en el caso de la proteína bruta y la proteína recuperable fue más difícil la predicción obteniendo valores elevados del SEP y bajos coeficientes de determinación (Brunt y Drost, 2003, 2010; Brunt *et al.*, 2010; Fernández-Ahumada *et al.*, 2006; Haase, 2006).

Algunos autores atribuyen los bajos valores obtenidos a la reducida variabilidad de estos componentes y a los valores altos de los errores del método de referencia (Fernández-Ahumada *et al.*, 2006).

Además de esto, se ha evaluado la capacidad de la tecnología NIRS para clasificar las muestras cualitativamente en función del contenido de proteína. En una investigación desarrollada por Fernández-Ahumada *et al.* (2006), se realizó un análisis discriminante con el fin de clasificar las muestras en dos categorías según el contenido de proteína. Las muestras se dividieron en dos grupos: uno de los grupos incluía las muestras con bajo contenido en proteína recuperable (<14 mg/g), y el otro las muestras que presentaban valores elevados (≥ 14 mg/g) de este parámetro. Se utilizaron un total de 184 muestras para el estudio, de las cuales 161 (87,5%) fueron clasificadas correctamente. Los resultados obtenidos demostraron que, a pesar del bajo contenido de proteína, era posible clasificar las muestras de patata mediante tecnología NIRS atendiendo a este parámetro.

Evans y Muir (1999) publicaron un estudio cuyo objetivo era investigar la viabilidad de la espectroscopia NIR como un método para determinar la decoloración de las patatas asociada a los moratones, de forma no destructiva. En el estudio se utilizaron muestras de patatas registradas como susceptibles a la aparición de moratones. Se aplicó un impacto consistente a los tubérculos y después se almacenaron durante 16 horas. Los espectros NIR se midieron en los tubérculos pelados y sin pelar, tanto en la zona dañada como en la sana. Los resultados mostraron que los espectros de reflectancia de los tubérculos dañados sin pelar presentaban mayor reflectancia en el NIR que los tubérculos sanos. Además, en los tubérculos pelados, las diferencias fueron mayores en esas regiones. Basándose en estos resultados, los autores sugirieron que la detección de moratones mediante la tecnología NIRS es posible en los tubérculos sin pelar y casi con seguridad en los tubérculos pelados. Sin embargo, señalaron la necesidad de mejorar el método con el fin de conseguir unos resultados fiables y más precisos.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. MATERIAL Y EQUIPOS EMPLEADOS

3.1.1. MATERIAL VEGETAL

En la realización de este estudio se emplearon muestras de patata de dos variedades diferentes. Para los ensayos de impacto se utilizaron 100 tubérculos de la variedad Kennebec, empleándose esas mismas muestras en los ensayos de compresión y posterior análisis NIRS, y para analizar visualmente la evolución del posible daño producido en los puntos críticos de la línea de manipulación y envasado estudiada se utilizaron 90 tubérculos de la variedad Baraka. Todas las muestras empleadas fueron suministradas por la empresa navarra OPPOSA.

Antes de llevar a cabo los ensayos de impacto y compresión con las muestras de patata de la variedad Kennebec, se procedió a la caracterización de los tubérculos, para lo cual primeramente se enumeraron las patatas del 1 al 100, y una vez identificadas, se pesaron y midieron individualmente. A continuación, se detallan las características referentes al peso y tamaño medios de los tubérculos empleados (Tabla 5).

Tabla 5. Caracterización de los tubérculos variedad Kennebec

Nº Muestras	Valores medios		
	Peso (g)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)
100	212,76 ± 31,6	84,04 ± 8,3	72,90 ± 4,1
50 (1 a 50)	207,40 ± 29,6	82,30 ± 7,9	72,31 ± 4,0
50 (51 a 100)	218,13 ± 33,0	85,79 ± 8,5	73,49 ± 4,1

El peso (g) de cada patata se determinó con la balanza de precisión Mettler Toledo SB16001 (Figura 17.a), cuya capacidad máxima de medida es de 16.100 g con una precisión de 0,1 g, y en la determinación del tamaño se utilizó el calibre digital Mahr 16ES (Figura 17.b) para medir el diámetro (mm), en la zona ecuatorial, y la longitud (mm) de cada muestra.



(a)



(b)

Figura 17. Instrumentos empleados en la caracterización de los tubérculos: a) Balanza de precisión Mettler Toledo SB16001; b) Calibre digital Mahr 16ES

3.1.2. FRUTO ELECTRÓNICO

Para identificar y evaluar los diferentes puntos de la línea de manipulación y envasado susceptibles de provocar daños mecánicos en los tubérculos, se utilizaron dos tipos de frutos electrónicos: el IRD (de Techmark Inc.) y el Smart Spud (de PEI Innovations Inc.). A continuación, se detallan las características de cada uno.

IRD

El fruto electrónico IRD (*Impact Recording Device*) detecta cargas dinámicas por medio de un acelerómetro triaxial, registrando valores de intensidad máximos de 500 G's. Está constituido por un sensor de impactos (acelerómetro triaxial piezoeléctrico), un microprocesador con memoria de 32 K, un amplificador, un convertidor A/D, un reloj interno y una batería interna recargable de Ni-Cd, todo ello protegido por una capa de resina epoxi que le confiere una forma esférica. Existen diferentes tamaños de esfera para este modelo de Techmark Inc., empleándose en este caso la esfera de 70 mm de diámetro y 171 g de peso (Figura 18).



Figura 18. Fruto electrónico IRD

La puesta en marcha del dispositivo se realiza utilizando el programa informático específico PCIRD, que permite establecer antes de cada ensayo la frecuencia de muestreo y la sensibilidad al impacto, es decir, el límite mínimo de intensidad a partir del cual el dispositivo registra los valores de impacto. En este estudio se fijó el límite de intensidad en 10 G's y la frecuencia de muestreo la recomendada por el fabricante (3906 Hz).

La transferencia de los datos registrados en los ensayos se lleva a cabo conectando el fruto electrónico al ordenador y utilizando el programa PCIRD, citado anteriormente, que permite analizar los datos obtenidos. De esta forma, se consigue identificar el momento en que se producen los impactos y compresiones y su duración, así como cuantificar su intensidad y determinar la dureza del material contra el que se produce la carga mecánica.

Los parámetros que proporciona el fruto electrónico IRD son los siguientes:

- N: número de puntos que conforman cada impacto.
- Duración2: duración del impacto registrado. Se mide en milisegundos (ms).

- MaxG: máxima G o pico de aceleración registrado, medida de la intensidad del impacto. Se mide en G's (1 G equivale a $9,8 \text{ m/s}^2$).
- DeltaV2: cambio de velocidad registrado en cada impacto. Está relacionado con la absorción de energía por la superficie de impacto. Se mide en metros por segundo (m/s).
- HalfDelV2: cambio de velocidad registrado desde el comienzo del impacto hasta el punto de máxima G. Se mide en metros por segundo (m/s).

Para la caracterización de los impactos registrados por el IRD, en este estudio se utilizaron las variables MaxG y DeltaV2, ya que proporcionan información acerca de la intensidad y la superficie contra la que estos se producen. Cuanto menor es el valor de DeltaV2, la cantidad de energía absorbida por la superficie de impacto es menor, es decir, menos amortiguador es el material. Por ello, para un mismo valor de MaxG, la probabilidad de producirse un daño debido a un impacto será mayor cuanto menor sea DeltaV2.

Smart Spud

El Smart Spud pertenece a las últimas generaciones de frutos electrónicos diseñados para medir los impactos producidos durante la cosecha y los procesos de manipulación postcosecha, con el fin de detectar los puntos críticos y reducir los daños ocasionados en el producto. El dispositivo consta de un sensor de impactos, formado por cuatro acelerómetros triaxiales, y una batería de litio (CR123A) intercambiable. Ambos componentes se encuentran en el interior de un cilindro de plástico duro, de 50 mm de diámetro y 65 mm de altura, el cual se introduce dentro de una cubierta de goma que se asemeja al fruto objeto de estudio. En este caso, de las diferentes cubiertas disponibles, se utilizó la de forma más parecida al tubérculo de patata, con unas dimensiones de 110 mm de largo y 70 mm de diámetro. El peso total del fruto es de 318,8 g (Figura 19).



Figura 19. Fruto electrónico Smart Spud

Las cargas mecánicas sufridas por el fruto electrónico quedan registradas en una PDA y aparecen representadas en la pantalla, en forma de gráfico de barras verticales, en el mismo momento en que se producen, permitiendo al usuario visualizar y marcar todos los puntos críticos del proceso que se consideren importantes para su posterior análisis. La transmisión de los datos registrados por el Smart Spud se realiza a través de ondas de radio que los envían hasta la PDA y, posteriormente, son transferidos a un ordenador mediante cable.

El Smart Spud registra la intensidad, medida en G's, de los impactos producidos durante el proceso de manipulación en los ejes X, Y, Z. Por ello, para la caracterización de los impactos se empleó como variable de estudio la suma vectorial de la intensidad de los tres ejes, que se denominó SmartG.

3.1.3. EQUIPOS DE COMPRESIÓN E IMPACTO

Los ensayos de compresión e impacto realizados en este estudio, para reproducir los daños que sufren los tubérculos en una línea de manipulación, se llevaron a cabo utilizando un texturómetro y un impactador vertical (de caída libre), respectivamente.

Texturómetro

El texturómetro empleado fue el modelo TA-XT2 de Stable Micro Systems (Figura 20.a). El equipo está formado por una columna que actúa de soporte de un brazo móvil, donde se acoplan las diferentes sondas, y una plataforma sobre la que se coloca el fruto. De esta manera, el brazo se mueve hacia abajo para comprimir el producto con la sonda, a una velocidad y distancia determinadas, para volver después a su posición inicial (Figura 20.b).

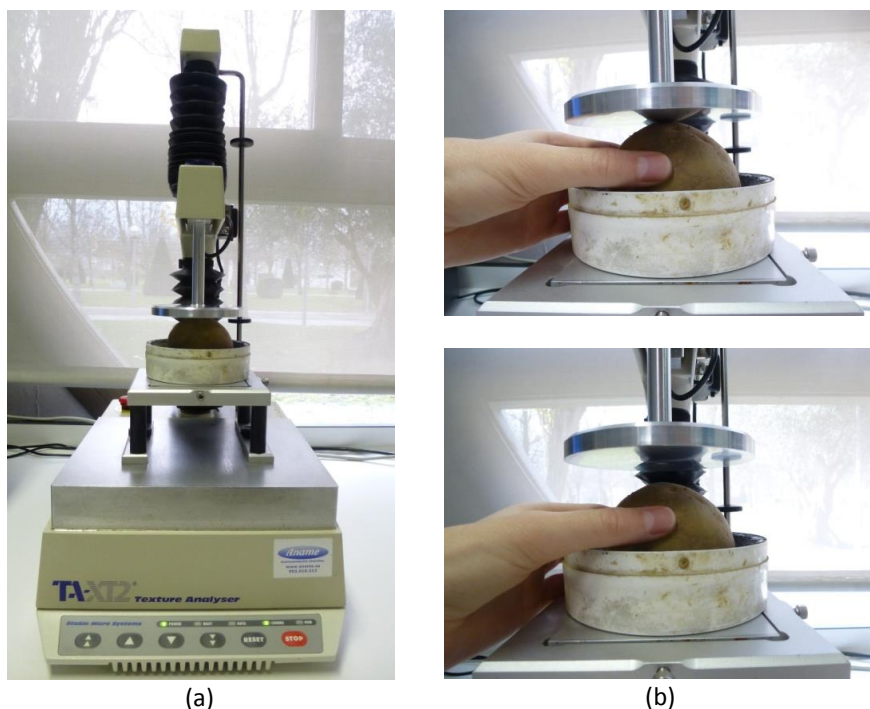


Figura 20. Ensayo de compresión: a) Texturómetro TA-XT2; b) Funcionamiento del equipo (compresión con la sonda empleada)

En este caso, se utilizó el plato de acero inoxidable de 100 mm de diámetro como sonda para los ensayos, y se establecieron como parámetros de ensayo la velocidad y la distancia de compresión. La velocidad fue de 2 mm/s durante el pre-ensayo, de 1mm/s durante el ensayo y de 10 mm/s durante el post-ensayo, y la distancia de compresión de 2mm y 3 mm, equivalentes a la deformación máxima producida en impactos con una altura de caída de 6 cm y 9 cm respectivamente.

El funcionamiento del equipo se controla por medio de un ordenador que, mediante el programa informático Texture_Expert, permite realizar los ensayos y analizar los datos registrados, los cuales quedan además representados gráficamente en la curva fuerza (N)/distancia (mm). Las variables que se obtienen en cada ensayo son: fuerza máxima (N), distancia (mm), pendiente de la curva (N/mm) y área comprendida bajo la curva (Nmm).

Impactador vertical (de caída libre)

El equipo de impacto empleado (Figura 21.a) consta de un soporte vertical, sobre el que va montado el brazo móvil que contiene un electroimán sujetando el cuerpo impactante, y una plataforma sobre la que se coloca el fruto. Este electroimán actúa como elemento disparador, permitiendo la caída del cuerpo impactante en el momento preciso. Funciona con un transformador de corriente continua conectado a la red que al desconectarse temporalmente, controlado desde un ordenador, deja de actuar como imán y suelta el cuerpo impactante desde una altura fijada previamente. La altura de caída (h) se regula manualmente mediante una rueda que permite el desplazamiento del brazo donde se aloja el electroimán. En este estudio se emplearon dos alturas de caída, 6 y 9 cm.

El cuerpo impactante está formado por un vástago cilíndrico, unido a un pequeño acelerómetro, en cuyo extremo se acoplan diferentes piezas semiesféricas. Esto permite modificar la masa del cuerpo impactante y el diámetro de la semiesfera en función del experimento. En este estudio se empleó la esfera metálica de 56 g de peso, consiguiendo una masa de impacto (vástago y esfera) de 87,5 g (Figura 21.b).

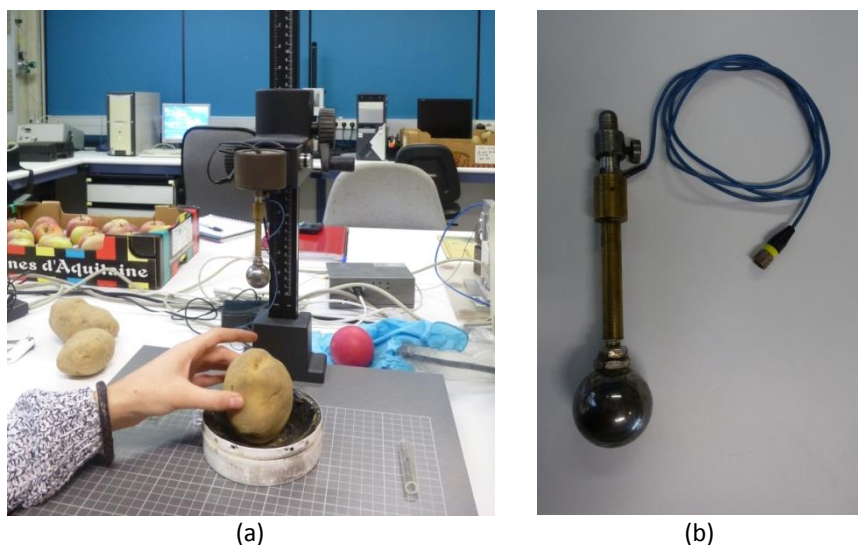


Figura 21. Equipo de impacto: a) Impactador vertical; b) Cuerpo impactante

El acelerómetro es el mecanismo sensible del sistema y está conectado al ordenador de tal manera que, cuando el cuerpo impactante entra en contacto con la muestra, envía la señal registrada (cambios de aceleración) a través de un convertidor analógico-digital. Una vez transferidos los datos, se analizan mediante un programa informático específico que permite extraer los parámetros característicos del impacto y almacenarlos en el ordenador. Los parámetros que se obtienen en cada ensayo son: fuerza máxima (N), deformación máxima (mm), deformación permanente (mm), energía máxima (J), energía absorbida (J) y duración del impacto (ms).

3.1.4. EQUIPO NIRS

Para obtener los espectros de reflectancia de las muestras, se empleó un espectrofotómetro AOTF-NIR modelo Luminar 5030 de la marca Brimrose (Figura 22.a). Este equipo utiliza la tecnología AOTF (Filtro optoacústico ajustable) y posee un detector InGaAs. El funcionamiento del equipo se basa en lo siguiente: un haz de luz se dirige hacia la muestra, choca con la misma y la luz reflejada es recogida por el detector, tal y como se indica en la Figura 22.b, el cual envía la información al ordenador para el procesamiento de los datos (Véase 2.5.1).

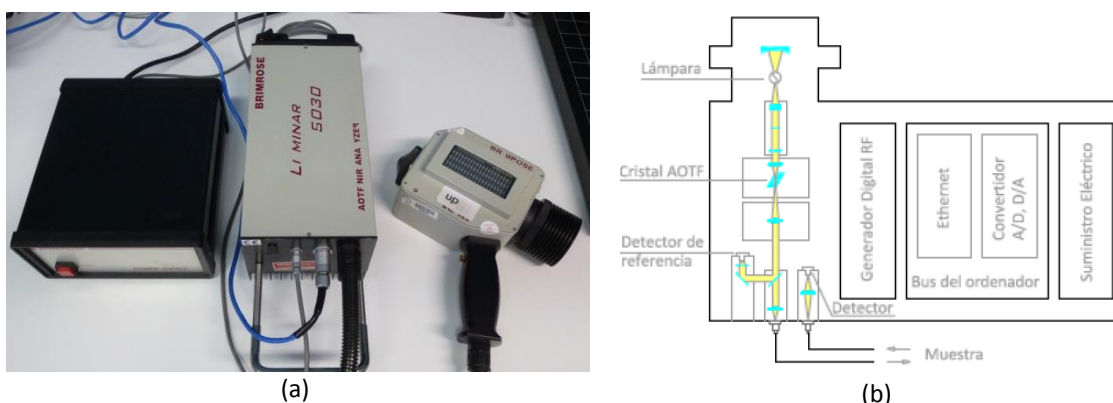


Figura 22. Espectrofotómetro: a) Analizador AOTF-NIR Luminar 5030; b) Esquema de funcionamiento del espectrofotómetro Luminar 5030

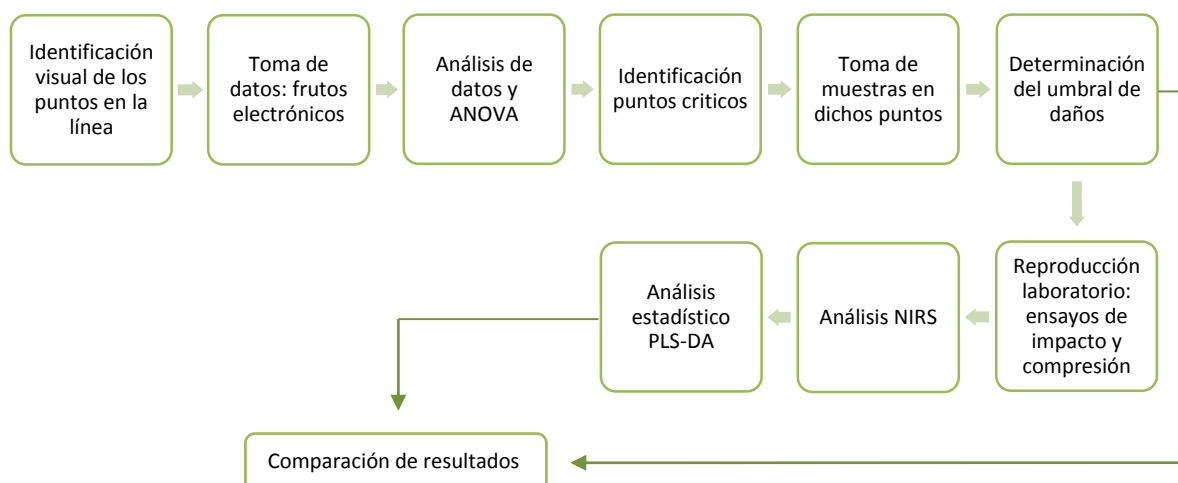
El rango espectral empleado para la medición fue de 1100 a 2300 nm, en intervalos de 2 nm, con una velocidad de escaneo de 16.000 longitudes de onda por segundo. Para realizar cada medición, el espectrofotómetro toma 50 espectros y proporciona el espectro medio, obteniendo así los valores de reflectancia para cada longitud de onda medida.

Antes de realizar la toma de datos se procede a la calibración del equipo utilizando una de las muestras, considerando que el equipo está bien calibrado cuando la ganancia energética del amplificador interno se encuentre entre los valores 33.000 y 66.000 (Cuesta *et al.*, 1991).

3.2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo implica por un lado establecer un umbral de daños en patata mediante la evaluación de los puntos críticos en una línea real de manipulación y envasado, y por otro identificar dichos daños mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano.

A continuación, se muestran los diferentes pasos desarrollados durante este estudio:



La identificación de los puntos críticos de la línea de manipulación, se realizó en la línea de clasificación y envasado que la empresa navarra OPPOSA posee en Noain. En primer lugar, se identificaron y enumeraron todos los puntos susceptibles de provocar daños. De esta manera, se distinguieron dos zonas diferenciadas: la Zona 1 correspondiente a la limpieza y clasificación de los tubérculos, donde se eliminan piedras y otros elementos y donde se clasifican los tubérculos de acuerdo a su tamaño; y la Zona 2 correspondiente al envasado de los tubérculos para su venta. Una vez identificados dichos puntos, se anotó la altura de caída y el material de cada uno de ellos.

En la Figura 23 se puede observar de forma esquematizada el diseño de la línea completa con cada uno de los puntos estudiados, los cuales se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Puntos estudiados en la línea de manipulación

ZONA 1			ZONA 2
1. Tolva 1	10. Cinta larga	19. Clasificación	26. Salida elevador 4
2. Salida tolva 1	11. Cinta 2	20. Cinta 5	27.A Salto cinta
3. Salida elevador 1	12. Cinta 3	21. Cinta 6	27.B Cajón recepción
4. Limpieza	13. Descarga 1	22. Descarga 2	28. Cazoletas
5. Cinta 1	14. Caída tolva 2	23. Caída tolva 3	29. Cinta 7
6. Caída elevador 2	15. Salida tolva 2	24. Salida tolva 3	30. Saco
7. Salida elevador 2	16. Caída elevador 3	25. Caída elevador 4	
8. Criba	17. Salida elevador 3		
9. Salida Criba	18. Cinta 4		

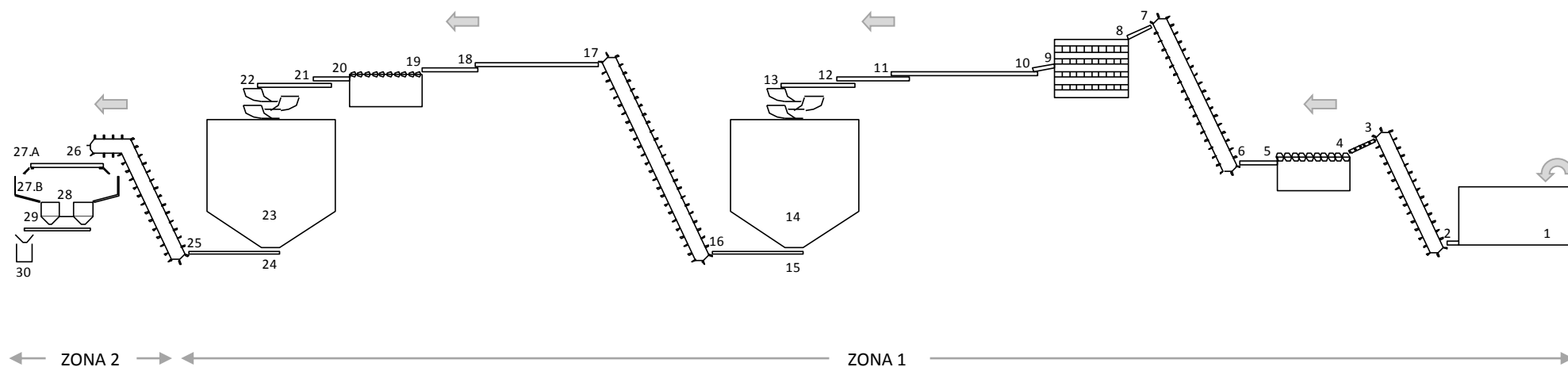


Figura 23. Esquema de la línea de clasificación y envasado

En esa misma línea se llevó a cabo la toma de datos con los frutos electrónicos citados anteriormente, en condiciones normales de funcionamiento y con la línea en vacío, para determinar la intensidad máxima de los impactos que se producen en los puntos de transferencia. Cronometrando el tiempo a lo largo del proceso de manipulación y observando el dispositivo, se identificaron las zonas de mayor daño. Los frutos se introdujeron en la línea varias veces, 5 repeticiones en el caso del IRD y 3 repeticiones en el caso del Smart Spud, para considerar la variabilidad entre los distintos recorridos que pudiesen tomar los mismos. Una vez registrados los datos, se transfirieron al ordenador para su posterior análisis, en el cual se identificaron los puntos críticos de la línea de manera objetiva. Además, se realizó un análisis estadístico ANOVA con estos datos.

Tras identificar dichos puntos, se procedió a la recogida de muestras de patata en los mismos. Se recogieron un total de 90 tubérculos de la variedad Baraka, la cual estaba siendo manipulada en ese momento, en tres puntos de la línea (30 tubérculos por punto): Tolla 1, considerado como el punto de control, para conocer los posibles daños con los que entran en la línea; Salida criba y Salida tola 3 para conocer los daños reales que se producen a la salida de las fases de limpieza y clasificación en la Zona 1. No se pudieron tomar muestras de la Zona 2, ya que la máquina de envasado no estaba operativa en ese momento.

La evolución del posible daño ocasionado en estos tubérculos se analizó de manera visual transcurrido un periodo de 24, 48 y 72 horas desde la recogida de muestras, para lo cual se eligieron al azar 30 tubérculos cada día, 10 de cada punto, que se pelaron (con un pelador manual) y fotografiaron. Esto sirvió para establecer el umbral de daños, correlacionando la aparición real del daño con los datos registrados por los frutos electrónicos en los diferentes puntos.

El siguiente paso fue reproducir los impactos y compresiones a los que son sometidos los tubérculos en la línea en el laboratorio de "Ingeniería de Posrecolección y Manipulación de Productos Agrarios" de la ETSIA de la Universidad Pública de Navarra, bajo condiciones controladas y tomando como referencia los datos de los frutos electrónicos. En primer lugar, se llevaron a cabo los ensayos de impacto utilizando 100 tubérculos de la variedad Kennebec, los cuales se dividieron en dos grupos: el primer grupo formado por los primeros 50 tubérculos, a los que se les aplicó un impacto con el indentador a una altura de caída de 6 cm; y el segundo grupo formado por los 50 tubérculos restantes, a los que se les aplicó un impacto con el indentador a una altura de caída de 9 cm. Estos mismos tubérculos se utilizaron en los ensayos de compresión, aplicando en este caso una distancia de compresión de 2mm a los tubérculos del primer grupo, y de 3 mm a los del segundo grupo. Los impactos y compresiones se realizaron sujetando cada tubérculo sobre una base y aplicando la carga en la zona distal de los tubérculos y en extremos opuestos, extremo apical y basal indistintamente, para evitar que los efectos de un ensayo influyesen en los resultados del otro.

Para realizar los ensayos NIRS, se estableció un grupo Control con los tubérculos intactos (sin pelar y antes de someterlos a los ensayos de impacto y compresión), que se analizaron en la zona de posterior aplicación de la carga mecánica. A continuación, una vez realizados los impactos y compresiones, se volvieron a analizar dichas muestras con el equipo NIRS sobre los mismos puntos, una vez transcurridas 1, 5, 9 y 24 horas, constituyéndose el grupo calificado como dañado. Para la toma de datos se realizaron cuatro réplicas por muestra, sumando un total de 4.000 datos. La Figura 24 muestra el esquema empleado en la realización de los ensayos.

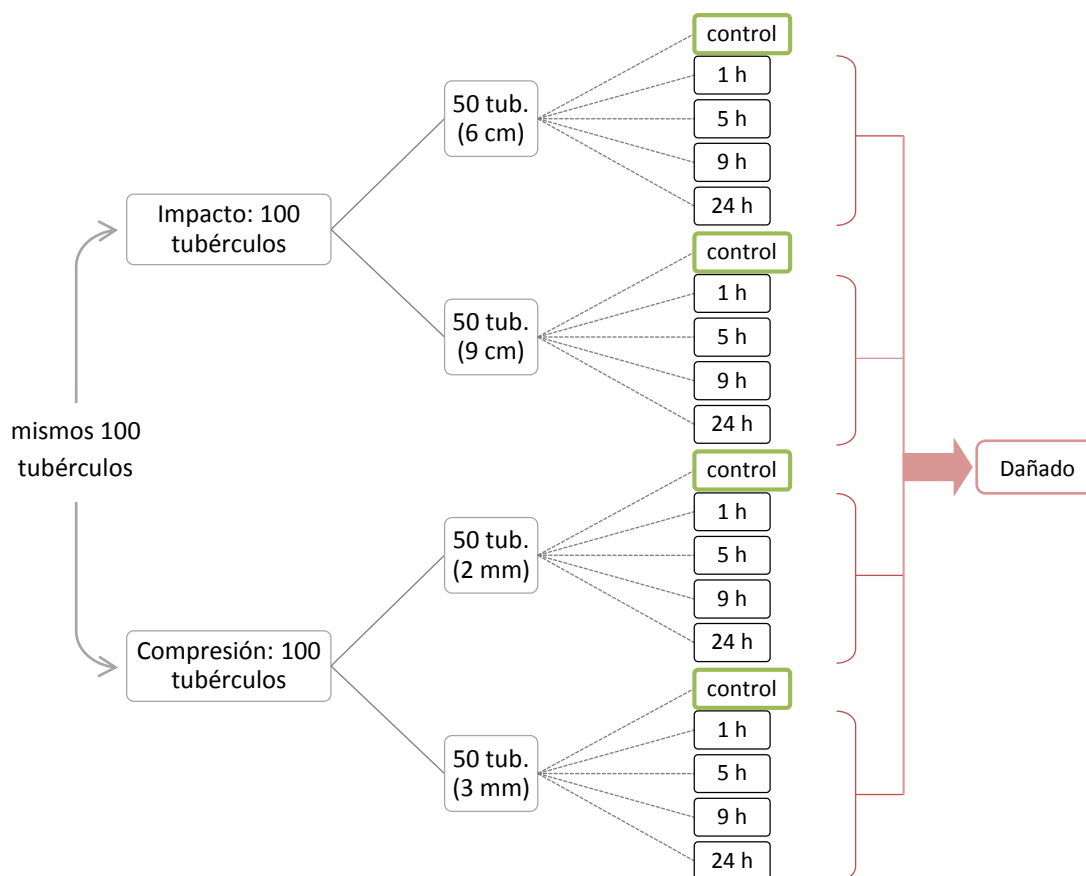


Figura 24. Esquema de los ensayos NIRS

Los tubérculos empleados en los ensayos de impacto y compresión y en los análisis NIRS, se pelaron y fotografiaron para determinar la aparición de daños en los días siguientes a la aplicación de la carga. Los daños visibles en los tubérculos se evaluaron durante 5 días, empleando para ello 10 tubérculos por día y parámetro de estudio, primero para las muestras de impacto (6 cm y 9 cm) y después para las de compresión (2 mm y 3 mm).

Por último, se realizó un análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) (ver punto 3.3.2) con estos dos grupos (control y dañado). Para el análisis discriminante se dividieron las muestras al azar en los grupos de calibración y validación, correspondiendo al 70% y al 30% de los datos respectivamente. El grupo de calibración se utilizó para el desarrollo del modelo de clasificación, mientras que el grupo de validación se utilizó para evaluar éste externamente.

3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

3.3.1. ANOVA

El análisis de la varianza (ANOVA) permite establecer si entre varias series de datos, con particularidades propias, existen diferencias y la significación o no de las mismas. Es decir, comprueba si las medias entre dos o más grupos son significativamente diferentes o no. En aquellos casos en los que el análisis de la varianza tenga resultado positivo, se realiza un test de comparación de medias (pruebas post-hoc) para identificar entre que grupos se producen esas diferencias.

En este estudio se realizó un análisis de la varianza ANOVA, con un intervalo de confianza del 95%, para ver si los impactos registrados por los dos frutos electrónicos empleados eran significativamente diferentes o no. Se realizó un ANOVA de un solo factor (punto de la línea estudiado), considerando como variables respuesta los valores de MaxG y DeltaV2 proporcionados por el fruto electrónico IRD y el valor de SmartG obtenido del Smart Spud. El método de comparación de medias elegido fue el Test de Duncan.

Para el análisis ANOVA se empleó el programa informático SPSS (*Statistical Package for the Social Science*) versión 21 (SPSS Chicago, IL).

3.3.2. PLS-DA

El análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) es una técnica de clasificación lineal supervisada, que se basa en el algoritmo de regresión PLS (Ballabio y Consonni, 2013). Como se explica en el punto 2.5.3, el PLS es un método de regresión lineal que establece la relación entre las variables predictivas (X) y la variable dependiente (Y). Trata de explicar la varianza del conjunto de datos, al mismo tiempo que correlaciona los datos con la respuesta.

En el PLS-DA, las principales fuentes de variabilidad en los datos se representan mediante variables latentes (LVs), que son combinaciones lineales de las variables originales. Cuando se trabaja con PLS-DA, la variable dependiente (Y) se transforma en una matriz simulada en código binario con el mismo número de filas que X y el mismo número de columnas que los grupos definidos en X. De esta forma, cada columna de Y será un vector formado por ceros, excepto para aquellos componentes que pertenecen a las muestras de esa categoría que serán iguales a 1 (Vitale *et al.*, 2013).

Para este trabajo se realizaron 11 análisis PLS-DA siguiendo un determinado orden, de lo general a lo particular, con el fin de obtener una diferenciación clara de los daños presentes en los tubérculos. Los grupos que se tuvieron en cuenta para realizar cada PLS-DA fueron muestras sanas (grupo control) frente a muestras dañadas en nueve de los análisis, y muestras dañadas a las 1, 5, 9 y 24 horas de producirse la carga mecánica en los otros dos análisis restantes.

Se introdujo una matriz respuesta (Y) para cada modelo PLS-DA desarrollado. Así, en los análisis con dos grupos de muestras, la matriz (Y) estaba compuesta por dos columnas: la primera con un vector dependiente [1 0] correspondiente al grupo control, y la segunda con un vector [0 1] correspondiente al grupo dañado. En los análisis con cuatro grupos de muestras, la matriz respuesta (Y) estaba formada por cuatro columnas: la primera con un vector dependiente [1 0 0 0] (daños tras 1h), la segunda con el vector [0 1 0 0] (daños tras 5h), la tercera con el vector [0 0 1 0] (daños tras 9h) y la cuarta con un vector [0 0 0 1] (daños tras 24h).

La precisión del modelo PLS-DA se verifica, entre otros parámetros, por el porcentaje de muestras clasificadas correctamente, un factor relacionado con la sensibilidad y especificidad de las categorías dentro del modelo. La sensibilidad (*sensitivity*) de una clase (A), se define como la proporción de muestras que pertenecen a esa clase (A) clasificadas correctamente (*true positives*, TP), denominando al conjunto de muestras pertenecientes a la clase (A) clasificadas como de clase (B) falsos positivos (*false positives*, FP). Sin embargo, la especificidad (*specificity*) de esa misma clase (A) corresponde a la proporción de muestras que pertenecen a la clase (B) que se clasifican como pertenecientes a esa clase (B), denominando a las muestras pertenecientes a la clase (B) y clasificadas como de clase (A) falsos negativos (*false negatives*, FN).

Estos parámetros se pueden escribir de la siguiente manera (Parikh *et al.*, 2008):

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \qquad Specificity = \frac{TN}{FP + TN}$$

Los valores de sensibilidad y especificidad varían entre cero y uno, siendo este último el resultado ideal para ambos parámetros, ya que indica una clara diferenciación entre las muestras sometidas a estudio.

Para desarrollar cada modelo de PLS-DA, las muestras se dividieron al azar en los grupos de calibración y validación, correspondiendo al 70% y al 30% de los datos respectivamente. El conjunto de datos del grupo de calibración se utilizó únicamente para construir el modelo de clasificación, mientras que los datos del grupo de validación se utilizaron para evaluar externamente su capacidad de clasificación. La precisión global del modelo en los grupos de calibración (validación cruzada) y validación se determinó por el porcentaje de las muestras clasificadas correctamente, y por la sensibilidad (*sensitivity*) y especificidad (*specificity*) de cada clase.

En los PLS-DA realizados en este trabajo se aplicaron dos pretratamientos de manera simultánea, el SNV y el *mean center* (MC) (definición de las técnicas en el punto 2.5.3).

Tanto el pretratado de los datos como el análisis PLS-DA se llevaron a cabo con el programa informático para el análisis multivariante PLS_Toolbox (Eigenvector Research Inc., Wenatchee, WA), trabajando bajo el entorno Matlab R2014a (The MathWorks, Natick, MA).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS Y COMPRESIONES

Tal y como se ha indicado en materiales y métodos, la línea de manipulación consta de dos zonas diferenciadas, denominadas como Zona 1 o clasificadora y Zona 2 o envasadora, a las que corresponden un número determinado de elementos seleccionados como puntos susceptibles de provocar daños (ver punto 3.2). A continuación, se detallan las características referentes a la altura de caída y el material de cada uno de los puntos estudiados.

Tabla 7. Caracterización de los puntos de la línea

ZONA 1			ZONA 2		
Elemento	Altura caída (cm)	Material	Elemento	Altura caída (cm)	Material
Tolva 1	88	goma-acero	Salida elevador 4	39	goma
Salida tolva 1	17	goma	Salto cinta	13,5	goma
Salida elevador 1	24	metal	Cajón recepción	25	metal
Limpieza	13_9*	rodillos	Cazoletas	33	metal
Cinta 1	17_10*	goma	Cinta 7	21	goma
Caída elevador 2	40,5	goma	Saco	128	plástico-goma
Salida elevador 2	-	goma			
Criba	20	acero			
Salida criba	10	acero			
Cinta larga	15	goma			
Cinta 2	26,5	goma			
Cinta 3	21,5	goma			
Descarga 1	45	lona			
Caída tolva 2	-	goma-acero			
Salida tolva 2	32	goma			
Caída elevador 3	30	goma			
Salida elevador 3	-	goma			
Cinta 4	22	goma			
Clasificación	19	rodillos			
Cinta 5	26,5_7,5*	goma			
Cinta 6	25	goma			
Descarga 2	49,5	lona			
Caída tolva 3	-	goma-acero			
Salida tolva 3	32	goma			
Caída levador 4	40	goma-metal			

(nº_nº*: subgolpes dentro de cada punto)

En primer lugar, se analizaron los datos registrados por el fruto electrónico IRD, que aporta información acerca de la intensidad del impacto (MaxG) y la dureza del material contra el que éste se produce (DeltaV2). Representando los histogramas de distribución de impactos para la variable MaxG (Figura 25), se observa como de forma general los impactos de mayor intensidad, es decir, aquellos en los que el riesgo de producirse daño en la patata es mayor, son muy poco frecuentes en ambas zonas. A pesar de ello, se produce un gran número de impactos de baja intensidad (entre 10 y 20 G's) en la Zona 1.

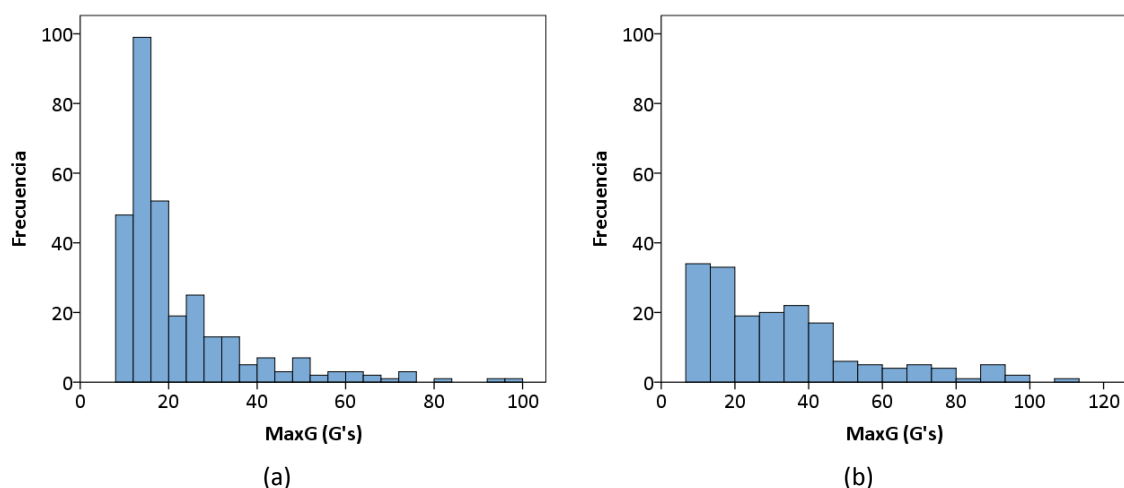


Figura 25. Histogramas de la variable MaxG: a) Zona 1 (N=308); b) Zona 2 (N=178)

Analizando los datos por elemento (Figura 26), se puede observar cómo hay puntos de la línea en los que la intensidad media del impacto (MaxG) es mayor, como es el caso de la cinta 3, caída tolva 2, caída tolva 3, la caída al elevador 4 o el saco. Sin embargo, al analizar los datos referentes al tipo de material (Figura 27), se observa cómo es en esos puntos con valores de intensidad más altos (cinta 3 y saco) donde se registran los mayores valores de DeltaV2, debido a que el material contra el que se produce el impacto es de goma o plástico-goma. Esto hace que el riesgo de daños en el resto de puntos sea mayor, al impactar la patata contra elementos metálicos (acero), ya que, para valores similares de MaxG, la probabilidad de producirse daños en la patata es mayor cuanto menor es DeltaV2 (menos amortiguador es el material).

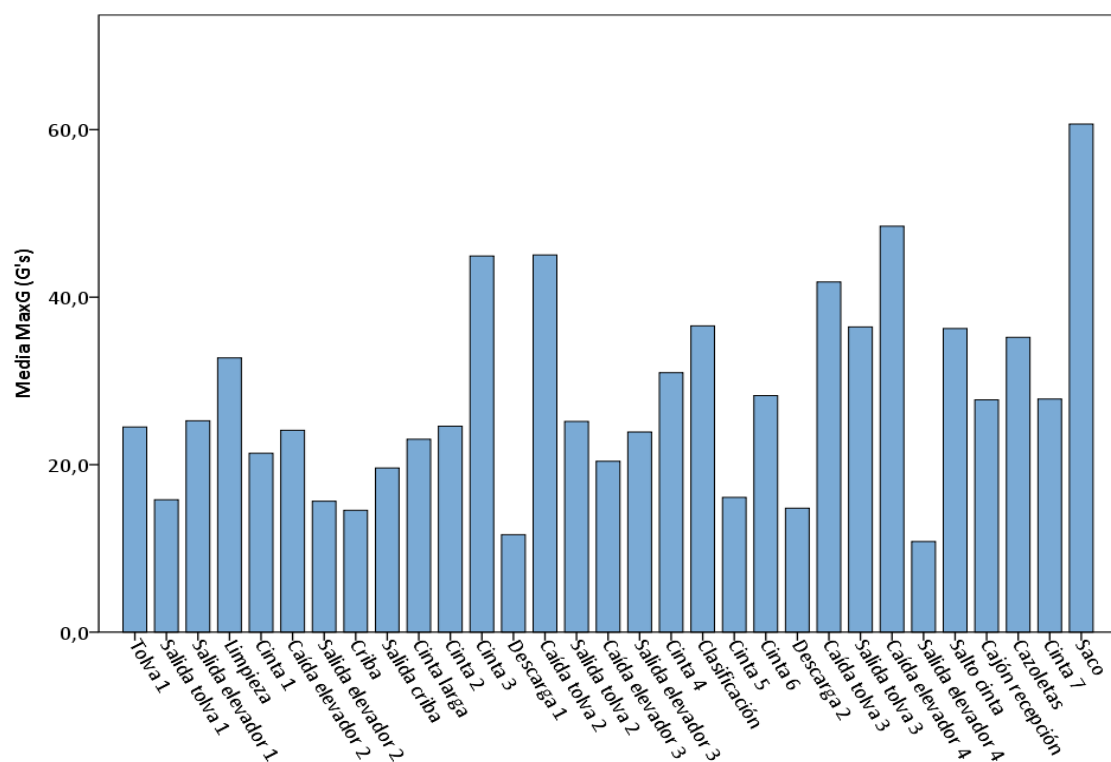


Figura 26. Intensidad de los impactos (MaxG) en los elementos de la línea de manipulación de patata

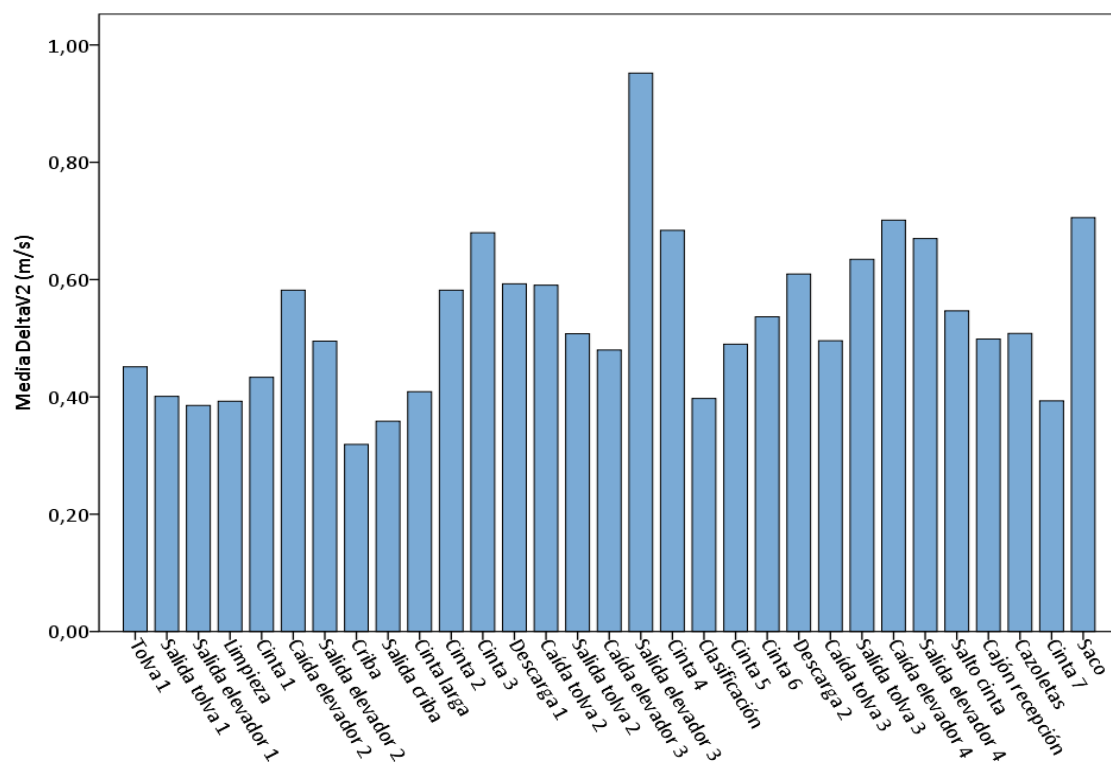


Figura 27. Cambio de velocidad (DeltaV2) en los elementos de la línea de manipulación de patata

Al analizar los datos registrados por el Smart Spud, que aporta información sobre la intensidad del impacto (SmartG), se observa una tendencia similar a los resultados obtenidos con el fruto electrónico IRD. Representando los histogramas para la variable SmartG (Figura 28), se aprecia una baja frecuencia de impactos de alta intensidad en ambas zonas de la línea, registrándose, además, un elevado número de impactos de baja intensidad (entre 0 y 15 G's) en la Zona 1.

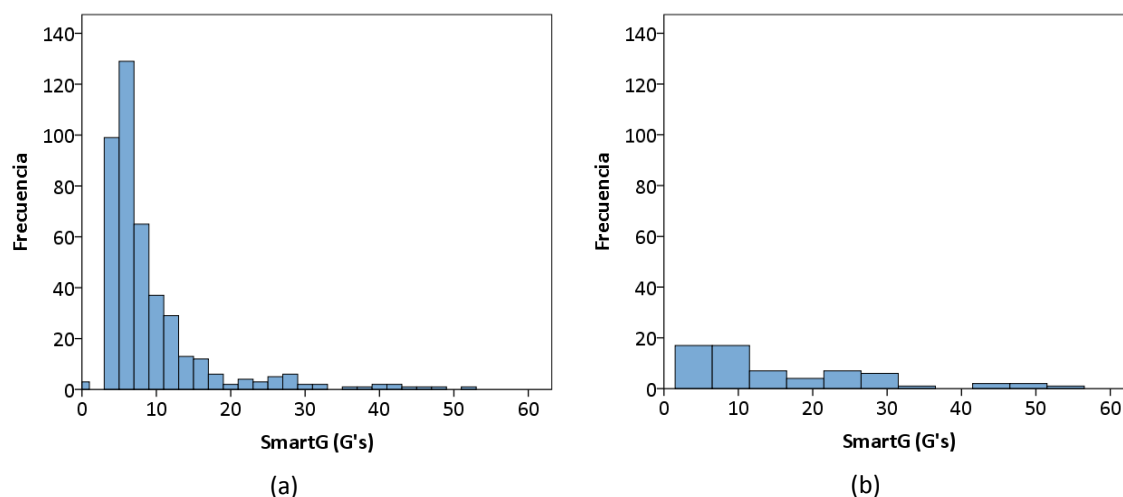


Figura 28. Histogramas de la variable SmartG: a) Zona 1 (N=427); b) Zona 2 (N=64)

Si se analizan los datos por elemento (Figura 29), se observa que en determinados puntos de la línea, como son la cinta 3, salida tolva 2, salida elevador 4, cajón recepción o el saco, el valor de la intensidad media del impacto (SmartG) es superior al resto.

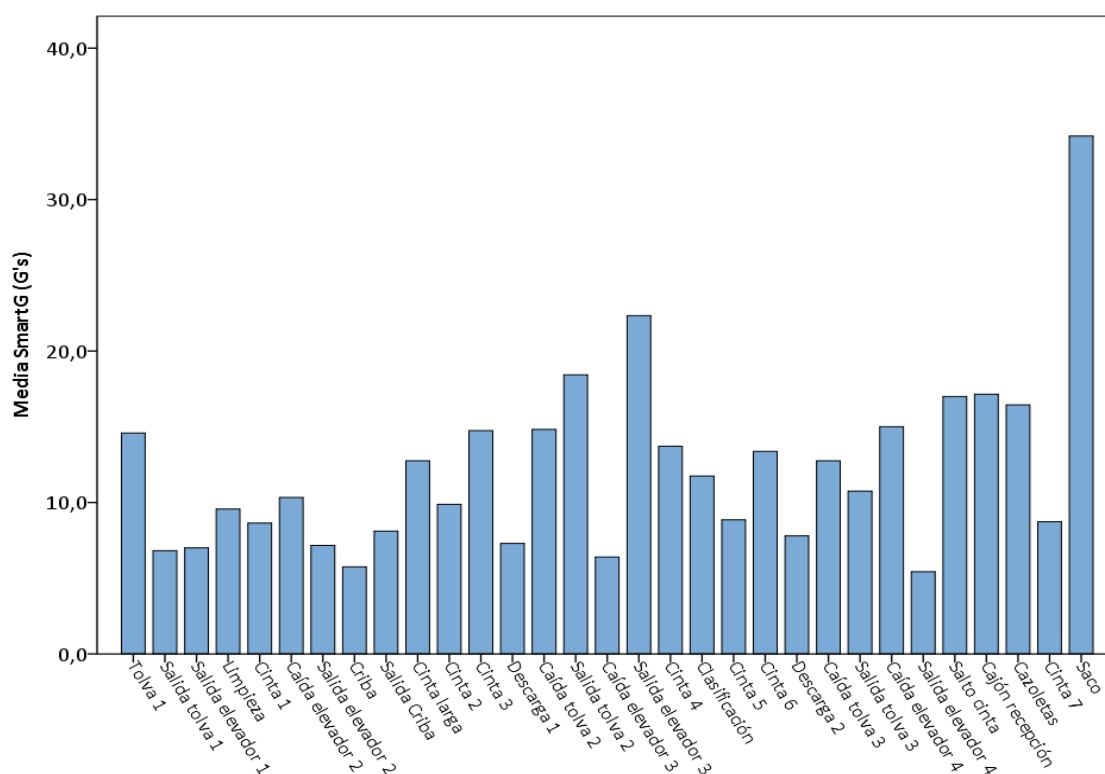


Figura 29. Intensidad de los impactos (SmartG) en los elementos de la línea de manipulación de patata

Los resultados obtenidos con ambos frutos electrónicos muestran cómo, a pesar de que los impactos de alta intensidad son muy poco frecuentes en ambas zonas de la línea, los valores de impacto más elevados se registran en la Zona 2 y, además, se producen un gran número de impactos de baja intensidad en la Zona 1. Asimismo, se observa que en los puntos de la línea donde se registran los mayores valores de impacto, coincidiendo en general con alturas de caída más altas, estos se producen sobre superficies más amortiguadoras, disminuyendo así el riesgo de daños en las patatas.

Estos mismos datos se utilizaron para llevar a cabo un análisis estadístico ANOVA (I.C.95%), con el objetivo de establecer si los impactos registrados en cada punto de la línea eran significativamente diferentes entre sí. Los resultados del análisis indicaron la existencia de diferencias significativas entre los distintos puntos de la línea (sig. < 0,0001; P=0,05) para las tres variables de estudio (MaxG, DeltaV2 y SmartG).

En la Tabla 8, se muestran los resultados del test de Duncan realizado para determinar entre qué puntos de la línea, en concreto, se dieron diferencias significativas en el impacto registrado. Los grupos establecidos en el test de comparación de medias aparecen indicados con letras, coincidiendo el valor más bajo de la media con la letra (a). Las combinaciones de letras que se observan en la mayoría de los casos indican la pertenencia de los mismos a más de un grupo.

Los resultados obtenidos para la variable MaxG indican que, a pesar de no existir diferencias significativas entre la caída al elevador 4 y el saco, la intensidad media del impacto en este último es significativamente diferente y superior a las del resto de puntos estudiados. Con respecto a la variable DeltaV2, se observa que el valor de la media en la salida del elevador 3 es significativamente diferente a las demás medias y que, aunque la criba no presente diferencias significativas con los valores de medias entre 0,4 y 0,5 m/s, esta es significativamente diferente e inferior a las de los puntos con materiales más amortiguadores (mayores valores de DeltaV2). Por último, analizando la variable SmartG se obtiene que la intensidad media del impacto en el saco es significativamente diferente y superior a las otras medias.

Como se puede apreciar, los resultados del test de Duncan para las variables MaxG y SmartG indican que, en ambos casos, el saco es el elemento de la línea en el que se obtiene un valor de intensidad media significativamente diferente y superior al resto, y que, en general, las medias se comportan de la misma manera para ambas variables. Sin embargo, también se observa que los datos del Smart Spud presentan valores de impacto de menor intensidad que el IRD. Esto se debe al tipo de material que recubre los frutos electrónicos, ya que, en el caso del Smart Spud la carcasa es de un material plástico blando (goma), el cual absorbe mejor los golpes registrando el acelerómetro por tanto valores más bajos, y en el IRD la cubierta está hecha de resina epoxi, cuya consistencia es más firme.

Tabla 8. Resultados del Test de Duncan para las tres variables estudiadas

Elemento	MaxG		DeltaV2		SmartG	
	Media (G's)	T.Duncan	Media (m/s)	T.Duncan	Media (G's)	T.Duncan
Tolva 1	24,5 ± 12,3	abcd	0,5 ± 0,3	abcd	14,6 ± 13,3	abcdefg
Salida tolva 1	15,8 ± 3,5	ab	0,4 ± 0,2	abc	6,8 ± 3,1	ab
Salida elevador 1	25,2 ± 8,7	abcd	0,4 ± 0,1	abc	7,0 ± 2,9	ab
Limpieza	32,8 ± 23,7	cdef	0,4 ± 0,2	abc	9,6 ± 4,8	abcdef
Cinta 1	21,4 ± 7,2	abcd	0,4 ± 0,2	abcd	8,6 ± 2,9	abcde
Caída elevador 2	24,1 ± 16,6	abcd	0,6 ± 0,3	bcdef	10,3 ± 6,4	abcdef
Salida elevador 2	15,6 ± 7,2	ab	0,5 ± 0,2	abcdef	7,2 ± 2,3	abc
Criba	14,6 ± 3,2	ab	0,3 ± 0,1	a	5,7 ± 2,2	ab
Salida criba	19,6 ± 3,3	abc	0,4 ± 0,1	ab	8,1 ± 3,4	abcde
Cinta larga	23 ± 12,3	abcd	0,4 ± 0,2	abc	12,8 ± 9,1	abcdef
Cinta 2	24,6 ± 8,2	abcd	0,6 ± 0,1	bcdef	9,9 ± 5,4	abcdef
Cinta 3	44,9 ± 15,3	fg	0,7 ± 0,1	ef	14,8 ± 9,8	abcdefg
Descarga 1	11,6 ± 1,2	a	0,6 ± 0,1	cdef	7,3 ± 3,0	abc
Caída tolva 2	45 ± 28,8	fg	0,6 ± 0,3	cdef	14,8 ± 12,6	abcdefg
Salida tolva 2	25,2 ± 9,9	abcd	0,5 ± 0,3	abcdef	18,4 ± 13,5	fg
Caída elevador 3	20,4 ± 6,1	abcd	0,5 ± 0,2	abcde	6,4 ± 1,5	ab
Salida elevador 3	23,9 ± 5,7	abcd	1 ± 0,2	g	22,3 ± 3,1	g
Cinta 4	31 ± 3,6	bcdef	0,7 ± 0,1	ef	13,7 ± 8,5	abcdefg
Clasificación	36,6 ± 23,1	defg	0,4 ± 0,2	abc	11,8 ± 4,1	abcdef
Cinta 5	16,1 ± 5,5	ab	0,5 ± 0,1	abcdef	8,9 ± 6,3	abcde
Cinta 6	28,3 ± 13,4	bcde	0,5 ± 0,2	abcdef	13,4 ± 9,7	abcdef
Descarga 2	14,8 ± 7,1	ab	0,6 ± 0,1	cdef	7,8 ± 3,6	abcd
Caída tolva 3	41,8 ± 28,2	efg	0,5 ± 0,3	abcdef	12,8 ± 10,1	abcdef
Salida tolva 3	36,4 ± 18,2	defg	0,6 ± 0,4	def	10,8 ± 16,6	abcdef
Caída levador 4	48,5 ± 29,0	gh	0,7 ± 0,3	ef	15,0 ± 19,0	bcdefg
Salida elevador 4	ns	-	ns	-	5,4 ± 1,6	a
Salto cinta	36,3 ± 2,9	defg	0,5 ± 0,05	bcdef	17,0 ± 10,4	defg
Cajón recepción	27,7 ± 16,1	abcde	0,5 ± 0,3	abcdef	17,2 ± 12,3	efg
Cazoletas	35,2 ± 27,3	cdefg	0,5 ± 0,3	abcdef	16,4 ± 12,3	cdefg
Cinta 7	27,8 ± 8,7	abcde	0,4 ± 0,1	abc	8,7 ± 4,8	abcde
Saco	60,7 ± 25,6	h	0,7 ± 0,3	f	34,2 ± 17,8	h

Considerando los impactos registrados por los frutos electrónicos y los resultados del análisis, se establecieron un total de 9 puntos críticos en la línea que se detallan a continuación.

Tabla 9. Elementos de la línea considerados como puntos críticos

Criba (Atura: 20 cm)	MaxG (G's) 14,6 DeltaV2(m/s) 0,3 (acero) SmartG (G's) 5,7	Caída elevador4 (Altura: 40 cm)	MaxG (G's) 48,5 DeltaV2(m/s) 0,7 (goma-metal) SmartG (G's) 15
			
Cinta 3 (Atura: 21,5 cm)	MaxG (G's) 44,9 DeltaV2(m/s) 0,7 (goma) SmartG (G's) 14,8	Salto cinta (Atura: 13,5 cm)	MaxG (G's) 36,3 DeltaV2(m/s) 0,6 (goma) SmartG (G's) 17
			
Caída tolva 2 (Atura:--)	MaxG (G's) 45 DeltaV2(m/s) 0,6 (goma-acero) SmartG (G's) 14,8	Cazoletas (Atura: 33 cm)	MaxG (G's) 35,2 DeltaV2(m/s) 0,5 (metal) SmartG (G's) 16,4
			
Clasificación (Atura: 19 cm)	MaxG (G's) 36,6 DeltaV2(m/s) 0,4 (rodillos) SmartG (G's) 11,8	Saco (Atura: 128 cm)	MaxG (G's) 60,7 DeltaV2(m/s) 0,7 (plástico-goma) SmartG (G's) 34,2
			
Caída tolva 3 (Atura: --)	MaxG (G's) 41,8 DeltaV2(m/s) 0,5 (goma-acero) SmartG (G's) 12,8		
			

A partir de las muestras tomadas en los tres puntos de la línea (Tolva 1, Salida criba y Salida tolva 3), se determinó el porcentaje de daños reales producidos en las distintas fases de la Zona 1. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de tubérculos dañados en cada fase de la Zona 1

Punto	% Tubérculos dañados		
	24h	48h	72h
Control (Tolva 1)	0	60	60
F. Limpieza (Salida criba)	80	80	90
F. Clasificación (Salida tolva 3)	80	100	90

Teniendo en cuenta que cada día se analizaron diez patatas diferentes para cada punto de estudio, se observa cómo, a medida que atraviesan las distintas fases, el porcentaje de tubérculos dañados se incrementa entre un 20-30% en la fase de limpieza (a la salida de la criba) y entre un 10-20% en la fase de clasificación, por lo que el porcentaje final de daños en la Zona 1 es de entre un 30-40%. Sin embargo cabe destacar que, conforme a los resultados obtenidos en el primer punto de estudio, un 60 % de los tubérculos que llegan a la línea presentan daños previos, ocasionados en las etapas anteriores del proceso productivo.

A continuación, se muestran ejemplos de fotografías tomadas transcurridas 24, 48 y 72 horas desde la toma de muestras de los tubérculos una vez pelados, ya que a simple vista no se apreciaron daños en la superficie de la patata.



Figura 30. Daños visibles en las muestras tomadas a la salida de la tolva 3

Mediante análisis previos realizados en laboratorio, analizando la intensidad del impacto con el fruto electrónico a diferentes alturas de caída, se estableció que el máximo valor de intensidad (108,3 G's) registrado en la Zona 1 (Tabla 11) se correspondía con una altura de aproximadamente 6 cm. Esta altura de caída se tomó de referencia para reproducir los ensayos en laboratorio bajo condiciones controladas, dado que en esta zona se producen entre un 30-40 % de daños. Por otro lado, Salar (2009) realizó ensayos de impacto en patata, utilizando el mismo equipo de impactos que el empleado en este trabajo, considerando una altura de caída de 8 cm. Tomando estos datos como referencia, y considerando los mismo análisis previos, se estableció una altura de caída de 9 cm (157,5 G's) en los ensayos de impacto para garantizar el daño en los tubérculos.

Teniendo en cuenta que los valores de umbral de daños son distintos para cada cultivar en condiciones diferentes, el valor de umbral de daños de 98 G's considerado en este estudio se asemeja a los valores de 90 G's comúnmente empleados por las empresas de patata en sus controles de calidad (Expido *et al.*, 2005). Además, otros autores han establecido valores de impacto alrededor de 100 G's como referencia de umbral de daños en patata (Hyde *et al.*, 1992; Molema, 1999).

Tabla 11. Rango y moda de las variables de los frutos electrónicos

	Elemento	MaxG (G's)		DeltaV2 (m/s)		SmartG (G's)	
		Rango	Moda	Rango	Moda	Rango	Moda
ZONA 1	Tolva 1	61,9 - 10,8	11,7	1,4 - 0,1	0,2	51,0 - 4,0	6,0
	Salida tolva 1	22,8 - 10,8	10,8	0,6 - 0,2	0,6	13,0 - 4,0	5,0
	Salida elevador 1	40,7 - 11,7	11,7	0,5 - 0,2	0,5	10,0 - 4,0	#N/A
	Limpieza	81,6 - 10,9	10,9	0,9 - 0,2	0,6	18,0 - 4,0	4,0
	Cinta 1	35,1 - 11,2	11,2	0,7 - 0,3	0,3	13,0 - 5,0	6,0
	Caída elevador 2	57,9 - 11,2	11,2	1,1 - 0,1	0,1	21,0 - 4,0	4,0
	Salida elevador 2	32,7 - 10,8	10,8	0,8 - 0,3	0,4	10,0 - 4,0	#N/A
	Criba	25,0 - 10,1	13,0	0,5 - 0,2	0,3	16,0 - 4,0	4,0
	Salida criba	25,3 - 16,6	16,6	0,5 - 0,3	0,3	13,0 - 4,0	6,0
	Cinta larga	46,1 - 11,2	11,2	0,7 - 0,2	0,2	28,0 - 4,0	#N/A
	Cinta 2	35,6 - 14,1	14,1	0,7 - 0,4	0,6	17,0 - 4,0	4,0
	Cinta 3	56,7 - 11,1	11,1	0,8 - 0,6	0,6	32,0 - 4,0	#N/A
	Descarga 1	15,4 - 10,3	10,5	0,8 - 0,5	0,5	13,0 - 4,0	5,0
	Caída tolva 2	98,6 - 12,3	12,3	1,1 - 0,2	0,8	42,0 - 4,0	5,0
	Salida tolva 2	38,7 - 13,9	13,9	0,9 - 0,2	0,3	38,0 - 4,0	#N/A
	Caída elevador 3	30,1 - 12,7	12,7	0,7 - 0,3	0,7	9,0 - 5,0	6,0
	Salida elevador 3	30,9 - 16,6	16,6	1,1 - 0,7	0,7	25,0 - 19,0	#N/A
	Cinta 4	35,2 - 28,1	28,1	0,8 - 0,6	0,6	24,0 - 6,0	6,0
	Clasificación	88,1 - 11,2	11,2	0,8 - 0,2	0,2	17,0 - 7,0	#N/A
	Cinta 5	22,5 - 11,4	11,4	0,6 - 0,3	0,3	27,0 - 4,0	6,0
	Cinta 6	43,8 - 11,5	17,5	0,7 - 0,3	0,6	30,0 - 5,0	10,0
	Descarga 2	34,3 - 10,3	11,5	1,0 - 0,4	0,5	15,0 - 4,0	4,0
	Caída tolva 3	108,3 - 12,1	12,1	1,1 - 0,2	0,2	45,0 - 5,0	5,0
	Salida tolva 3	58,1 - 15,1	15,1	1,0 - 0,2	0,2	35,0 - 0,0	0,0
	Caída elevador 4	90,4 - 13,6	13,6	1,0 - 0,3	0,3	47,0 - 0,0	5,0
ZONA 2	Salida elevador 4	10,8 - 10,8	10,8	0,7 - 0,7	0,7	8,0 - 4,0	4,0
	Salto cinta	40,8 - 32,3	32,3	0,6 - 0,5	0,6	23,0 - 5,0	23,0
	Cajón recepción	89,8 - 11,7	16,8	1,1 - 0,2	0,2	56,0 - 4,0	9,0
	Cazoletas	78,2 - 10,9	13,0	1,3 - 0,2	0,3	45,0 - 5,0	5,0
	Cinta 7	45,7 - 14,7	14,7	0,5 - 0,3	0,4	17,0 - 4,0	4,0
	Saco	99,8 - 27,2	27,2	1,2 - 0,4	0,6	49,0 - 8,0	#N/A

(#N/A: datos insuficientes para el cálculo)

Para realizar los ensayos de compresión se empleó como referencia la deformación producida por la fuerza máxima del impacto. Esta deformación fue de 2 mm en el caso del impacto a una altura de caída de 6 cm, y de 3 mm para la altura de 9 cm.

4.2. IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS: ANÁLISIS NIRS

Con los datos de los espectros de reflectancia obtenidos del escaneado de las muestras con el equipo NIRS tras los ensayos de impacto y compresión, se realizaron 11 análisis PLS-DA para identificar y clasificar los daños producidos en las patatas. Como se ha comentado en el apartado materiales y métodos, el orden seguido en la realización de los análisis fue de lo general a lo particular, considerando, en algunos casos, todos los parámetros de estudio (impactos y compresiones) y, en otros, combinaciones o casos concretos de parámetros de impacto y compresión. En la siguiente tabla se resumen las características y resultados de todos los análisis realizados.

Tabla 12. Características y resultados de los análisis PLS-DA

Parámetros	Nº grupos	Detalle grupos	N	Pretratamientos	LV	% Varianza	% Clasificación Gr. Validación
Todos	2	Control vs 24h	1600	SNV, MC	7	99,68	79,87
2 mm/6 cm	2	Control vs 24h	800	SNV, MC	6	99,29	83,27
3 mm/9 cm	2	Control vs 24h	800	SNV, MC	8	99,86	73,75
2 mm/3 mm	2	Control vs 24h	800	SNV, MC	5	99,19	66,25
6 cm/9 cm	2	Control vs 24h	800	SNV, MC	7	99,77	90,41
6 cm	2	Control vs 24h	400	SNV, MC	5	99,34	90,00
9 cm	2	Control vs 24h	400	SNV, MC	6	99,76	89,89
6 cm	2	Control vs Resto	400	SNV, MC	5	99,44	55,33
9 cm	2	Control vs Resto	400	SNV, MC	6	99,72	61,66
6 cm	4	1h vs 5h vs 9h vs 24h	800	SNV, MC	5	99,46	52,50
9 cm	4	1h vs 5h vs 9h vs 24h	800	SNV, MC	8	99,87	65,41

Como se puede observar, los mejores resultados de clasificación se obtuvieron en el análisis realizado para los datos de impacto (6 cm/9 cm) considerando los grupos Control y 24 horas, con un porcentaje de bien clasificados en la validación del modelo del 90,41%. Por este motivo, los posteriores análisis realizados se centraron en estudiar únicamente los parámetros de impacto por separado, considerando como grupos muestras sanas frente a muestras dañadas y muestras dañadas a las 1, 5, 9 y 24 horas de producirse el impacto. En todos los casos, se aplicaron los mismos pretratamientos espectrales a los datos (SNV y MC), ya que fueron éstos los que arrojaron los mejores resultados de clasificación, y se obtuvo un porcentaje de varianza explicada superior al 99%. A continuación, se exponen de forma más detallada cada uno de estos análisis.

En primer lugar, se analizaron los datos espectrales de los impactos a una altura de caída de 6 cm, para los grupos control y 24h. La siguiente gráfica muestra los espectros de reflectancia NIR obtenidos para estos dos grupos, en el rango espectral empleado (1100-2300 nm), antes de aplicar los pretratamientos a los datos.

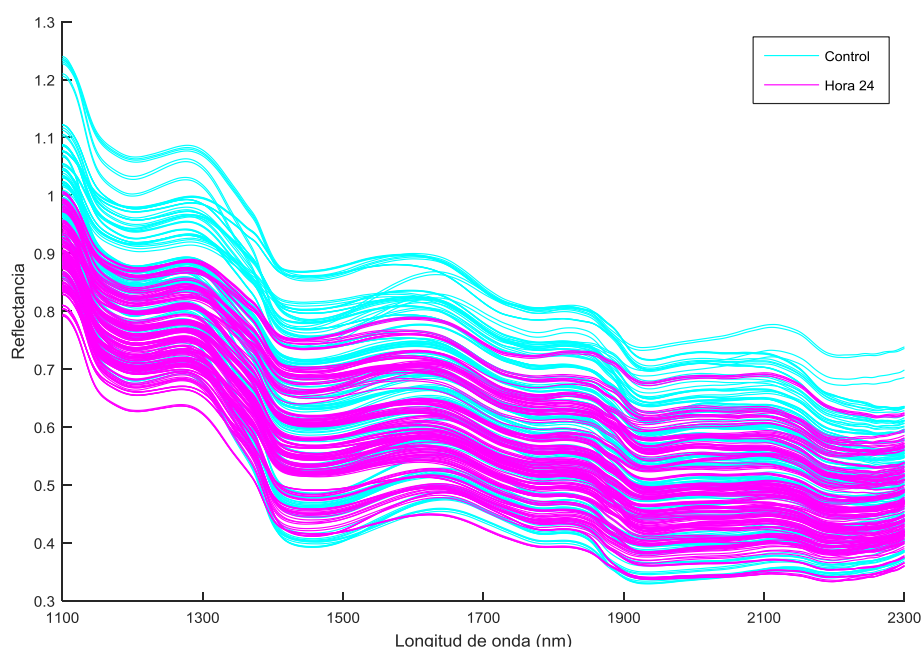


Figura 31. Espectros característicos de los grupos Control y 24h para impactos a 6 cm

En general, los picos observados en la región NIR se deben a sobretonos y combinaciones de modos vibracionales de los grupos funcionales C-H, O-H y N-H. Las bandas de absorción de los enlaces O-H aparecen en la región de 1450 nm, 1580 nm y 1900 nm, relacionadas con el contenido de agua (1450 nm y 1900 nm) y almidón (1580 nm y 1900 nm) de las muestras, y en la región NIR de 2100 nm, aparecen los picos de absorción correspondientes al contenido de proteínas de las mismas (Osborne *et al.*, 1993).

Como se puede observar, los espectros de reflectancia de ambos grupos (control y 24h) siguen un comportamiento similar a lo largo de la región NIR, diferenciándose únicamente en la magnitud de la reflectancia, ya que, en algunos casos, el grupo control presenta valores más altos.

Para poder extraer información de los espectros NIR se llevó a cabo un análisis PLS-DA con 5 LV, aplicando los pretratamientos espectrales SNV y MC, cuyos resultados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 13. Matriz de confusión para los grupos Control y 24h con los datos de 6 cm

Grupo estimado (%)	Validación cruzada	Grupo real (%)	
		Control	Hora 24
	Validación externa	Control	91,73
		Hora 24	8,27
	Validación externa	Control	86,67
		Hora 24	13,33

Tal y como se observa en la Tabla 13, los porcentajes de muestras clasificadas correctamente, tanto en la etapa de calibración (validación cruzada) como en la validación del modelo, son elevados para los dos grupos de estudio, presentando mejores valores de clasificación las muestras del grupo 24h. Estos resultados indican que el modelo desarrollado, para este caso en concreto, es capaz de diferenciar las muestras dañadas de las sanas de una forma clara.

Del mismo modo, los valores de sensibilidad y especificidad obtenidos en ambos grupos son elevados, superiores a 0,85 en todos los casos (Tabla 14), lo que sostiene la buena capacidad del modelo para diferenciar estos dos grupos de muestras.

Tabla 14. Sensibilidad y Especificidad para los grupos Control y 24h con los datos de 6 cm

	Sensibilidad		Especificidad	
	Validación cruzada	Validación externa	Validación cruzada	Validación externa
Control	0,917	0,867	0,977	0,933
Hora 24	0,977	0,933	0,917	0,867

La Figura 32 es la representación gráfica de la matriz de confusión obtenida para los grupos control y 24h con los datos de impacto a 6 cm. La línea horizontal discontinua indica el umbral por encima del cual una muestra es asignada a un grupo concreto, correspondiendo en este caso los datos localizados por encima del umbral a las muestras clasificadas como grupo control. Se puede observar cómo, tanto en el grupo de calibración como en el de validación, la mayor parte de las muestras del grupo control (91,73% y 86,67% respectivamente) están correctamente clasificadas, mientras que un porcentaje pequeño de muestras del grupo 24h (8,27% y 13,33% respectivamente) están incorrectamente asignadas al grupo control.

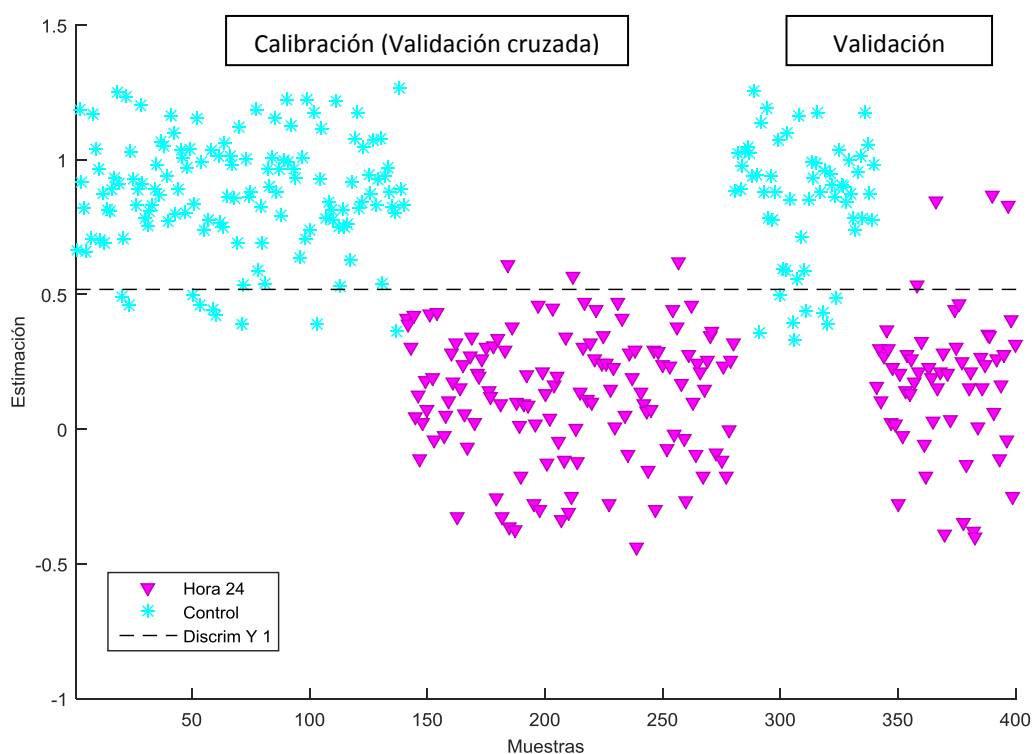


Figura 32. Resultados del modelo PLS-DA para los grupos Control y 24h a impactos de h=6 cm.
Estimación para el grupo control

En la grafica siguiente, aparecen representados los espectros de reflectancia NIR correspondientes a los datos de impacto a una altura de caída de 9 cm, para los grupos control y 24h. Como se puede apreciar en la Figura 33, los espectros de reflectancia se solapan y siguen una tendencia similar a lo largo de la región NIR en ambos casos, presentando los mismos picos de absorción que en los datos de impacto a 6 cm pero de menor magnitud.

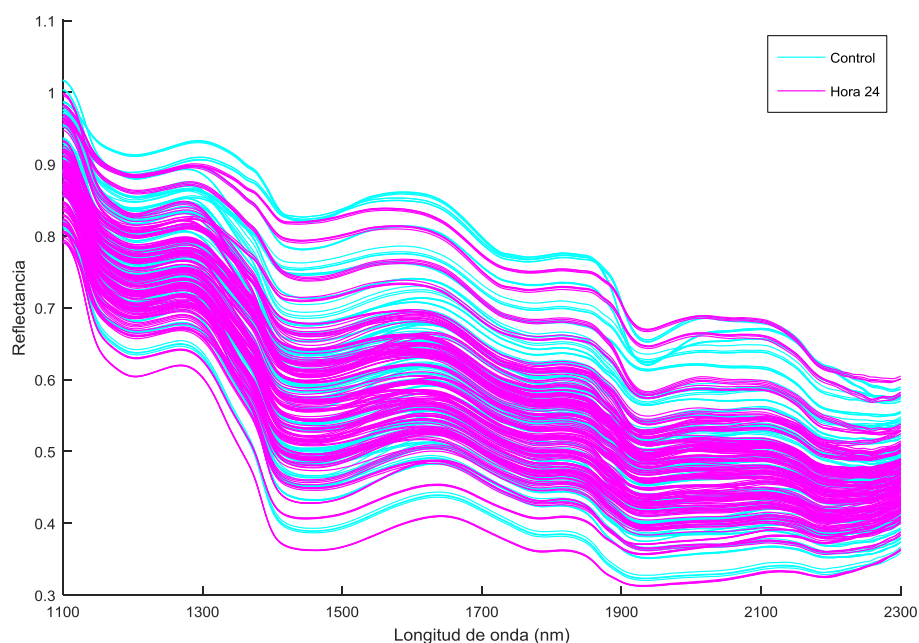


Figura 33. Espectros característicos de los grupos Control y 24h para impactos a 9 cm

Antes de realizar el análisis PLS-DA, se llevó a cabo el pretratado de los datos para intentar reducir las fuentes de error de las muestras, aplicando los pretratamientos espectrales SNV y MC de forma simultánea. Los resultados obtenidos en el análisis realizado con 6 LV para los grupos control y 24h, se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Matriz de confusión para los grupos Control y 24h con los datos de 9 cm

Grupo estimado (%)	Validación	Grupo real (%)	
		Control	Hora 24
	cruzada	Control	95,97
		Hora 24	4,03
	Validación externa	Control	86,44
		Hora 24	13,56

Como se puede observar, los porcentajes de muestras correctamente clasificadas son en todos los casos superiores al 85 %, presentando los mejores valores de clasificación en la calibración y en la validación del modelo, el grupo control y 24h respectivamente.

Asimismo, los valores de sensibilidad y especificidad obtenidos para los dos grupos de estudio son elevados, superiores a 0,85 tanto en la validación cruzada como en la validación del modelo (Tabla 16).

Tabla 16. Sensibilidad y Especificidad para los grupos Control y 24h con los datos de 9 cm

	Sensibilidad		Especificidad	
	Validación cruzada	Validación externa	Validación cruzada	Validación externa
Control	0,959	0,864	0,879	0,933
Hora 24	0,879	0,933	0,959	0,864

La Figura 34 es la representación gráfica de la matriz de confusión obtenida para los grupos control y 24h con los datos de impacto a 9 cm. La línea horizontal discontinua indica el umbral por encima del cual una muestra es asignada a un grupo concreto, correspondiendo en este caso los datos localizados por encima del umbral a las muestras clasificadas como grupo control. Se puede observar cómo, tanto en el grupo de calibración como en el de validación, la mayor parte de las muestras del grupo control (95,97% y 86,44% respectivamente) se clasifican como correspondientes a este grupo, mientras que un porcentaje pequeño de muestras del grupo 24h (4,03% y 13,56% respectivamente) están incorrectamente clasificadas como grupo control.

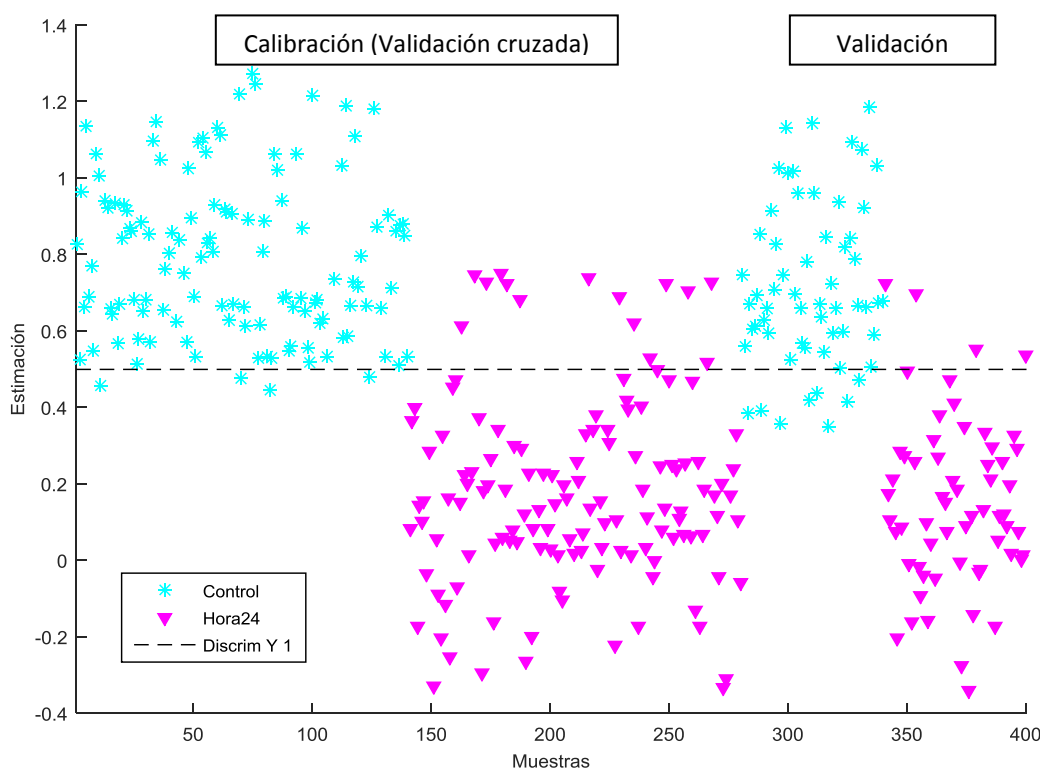


Figura 34. Resultados del modelo PLS-DA para los grupos Control y 24h a impactos de h=9 cm.
Estimación para el grupo control

Los resultados de sensibilidad y especificidad, así como el porcentaje de muestras clasificadas correctamente obtenidos en el análisis, indican la capacidad del modelo desarrollado para diferenciar las muestras dañadas de las sanas de forma correcta.

Como se ha podido comprobar, utilizando los espectros NIR obtenidos de las muestras sometidas a impactos a una altura de caída de 6 cm y 9 cm para los grupos Control y 24 horas, es posible diferenciar de forma no destructiva los tubérculos dañados de los sanos con elevados porcentajes de clasificación. Por ello, el siguiente paso fue establecer si, desarrollando un modelo PLS-DA para los datos de impacto considerando los grupos 1h, 5h, 9h y 24h, era posible diferenciar entre los daños presentes en los tubérculos a las 1, 5, 9 y 24 horas de producirse la carga mecánica.

La Figura 35 muestra la media de los espectros de reflectancia NIR obtenidos para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h correspondientes a los datos de impacto a 6 cm, realizada con el único objetivo de observar gráficamente las diferencias entre los espectros de los distintos grupos. Para ello, se utilizaron 200 espectros medios en cada grupo. En todos los casos se observa un comportamiento similar a lo largo de la región NIR, diferenciándose únicamente en la magnitud de reflectancia. Así, se puede apreciar que el grupo 1h presenta los valores de reflectancia más altos, y que se produce un solapamiento entre los espectros de los grupos 9h y 24h en la mayor parte de la región NIR estudiada, los cuales presentan los valores más bajos de reflectancia.

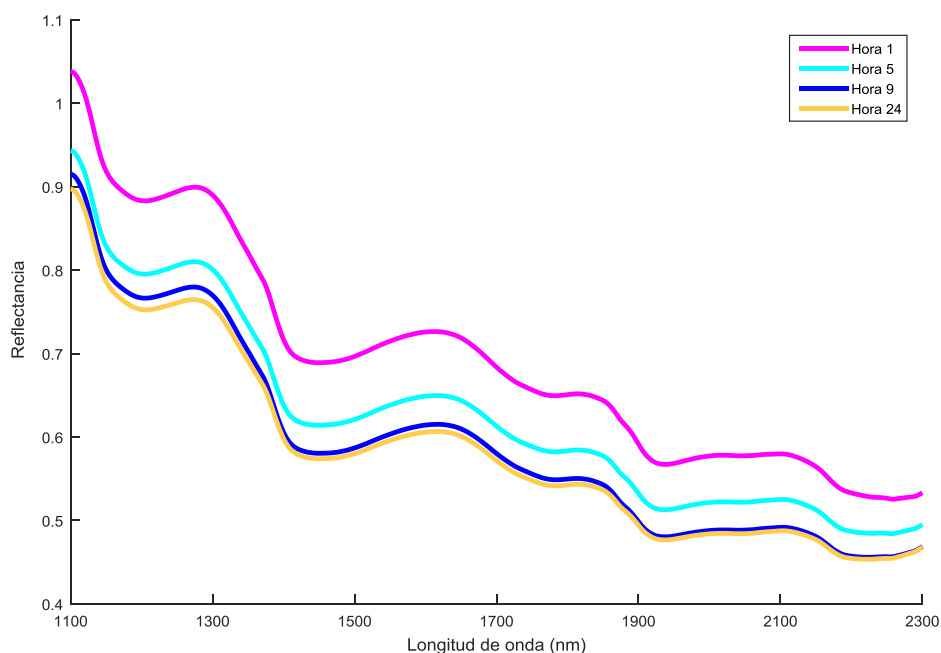


Figura 35. Espectros característicos de los grupos 1h, 5h, 9h y 24h para impactos a 6 cm

Los resultados del análisis PLS-DA realizado con 5 LV, aplicando los pretratamientos espectrales SNV y MC, para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h de los impactos a 6cm, se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 17. Matriz de confusión para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h con los datos de 6 cm

		Grupo real (%)			
		Hora 1	Hora 5	Hora 9	Hora 24
Grupo estimado (%)	Hora 1	80,0	21,66	10,0	0,0
	Hora 5	10,0	35,0	15,0	13,33
	Hora 9	8,33	11,67	23,33	15,0
	Hora 24	1,67	31,67	51,67	71,67

Como se puede observar, un porcentaje elevado de las muestras se clasifican correctamente para los grupos 1h y 24h, el 80% y el 71,67% respectivamente, mientras que en los otros dos grupos el porcentaje de muestras bien clasificadas en la validación del modelo no supera el 35%. Además, se puede apreciar como un porcentaje importante de muestras en los grupos 5h y 9h se clasifican como 24h, lo que indica que en la mayoría de los casos esas muestras se clasifican como pertenecientes a otro grupo.

Con respecto a los resultados de sensibilidad obtenidos, los valores más bajos corresponden al grupo 5h, que no alcanza el 0,5 ni en la etapa de calibración y ni en la validación, obteniéndose en el resto de grupos proporciones superiores a 0,8 en la mayoría de los casos. En el caso de la especificidad, únicamente se obtienen unas proporciones elevadas para el grupo 1h, ya que, en general, los resultados obtenidos tanto en la validación cruzada como en la validación son bajos (Tabla 18).

Tabla 18. Sensibilidad y Especificidad para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h con los datos de 6 cm

	Sensibilidad		Especificidad	
	Validación cruzada	Validación externa	Validación cruzada	Validación externa
Hora 1	0,908	0,800	0,830	0,861
Hora 5	0,408	0,467	0,725	0,678
Hora 9	0,728	0,817	0,485	0,467
Hora 24	0,791	0,850	0,662	0,667

Estos resultados indican la dificultad del modelo para diferenciar de forma clara los daños originados en las patatas en función de la hora de estudio (a las 1, 5, 9 y 24 horas de producirse el impacto), ya que únicamente se obtienen buenos resultados para el primer grupo, donde la aparición de daños seguramente no es tan notable si se comparan con los otros grupos.

La Figura 36 es la representación gráfica de la matriz de confusión de la validación externa obtenida para los 4 grupos horarios (hora 1, hora 5, hora 9 y hora 24) con los datos de impacto a 6 cm. La línea horizontal discontinua indica el umbral por encima del cual una muestra es asignada a un grupo concreto, correspondiendo en este caso los datos localizados por encima del umbral a las muestras clasificadas como grupo Hora 1. Se puede observar cómo la mayor parte de las muestras del grupo hora 1 (80%) se clasifican correctamente, mientras que unas pocas muestras del resto de grupos (hora 5, hora 9 y hora 24) aparecen incorrectamente clasificadas como grupo hora 1.

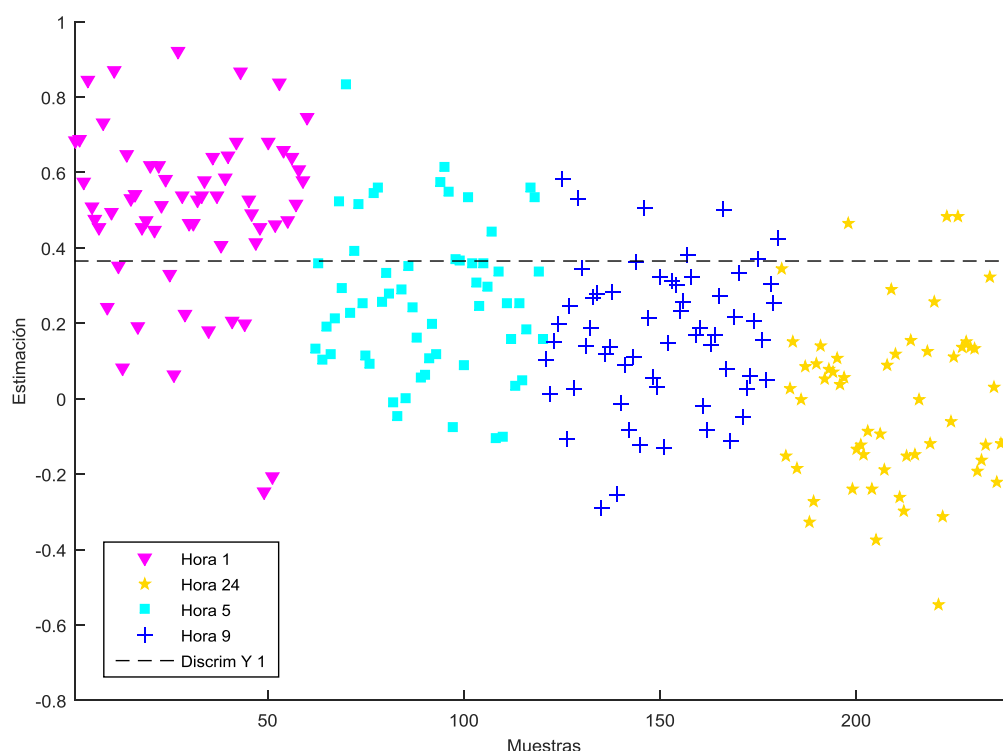


Figura 36. Resultados del modelo PLS-DA para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h a impactos de h=6 cm.
Estimación para el grupo 1h en la validación

A continuación, se muestran las medias de los espectros de reflectancia correspondientes a los datos de impacto a 9 cm para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h, obtenidas únicamente con el objetivo de diferenciar gráficamente los espectros de los distintos grupos, empleando para ello 200 espectros medios en cada grupo. Como se puede apreciar en la Figura 37, se observa una tendencia similar a lo largo de la región NIR estudiada en todos los casos, diferenciándose solamente en la magnitud de reflectancia que presentan. Así, el grupo 1h presenta los valores más altos y el grupo 24h los más bajos. Se observa además, que el espectro de este último grupo se solapa en varias regiones con el del grupo 9h, y que entorno a la región de 1100 nm se produce un solapamiento entre los grupos 5h, 9h y 24h.

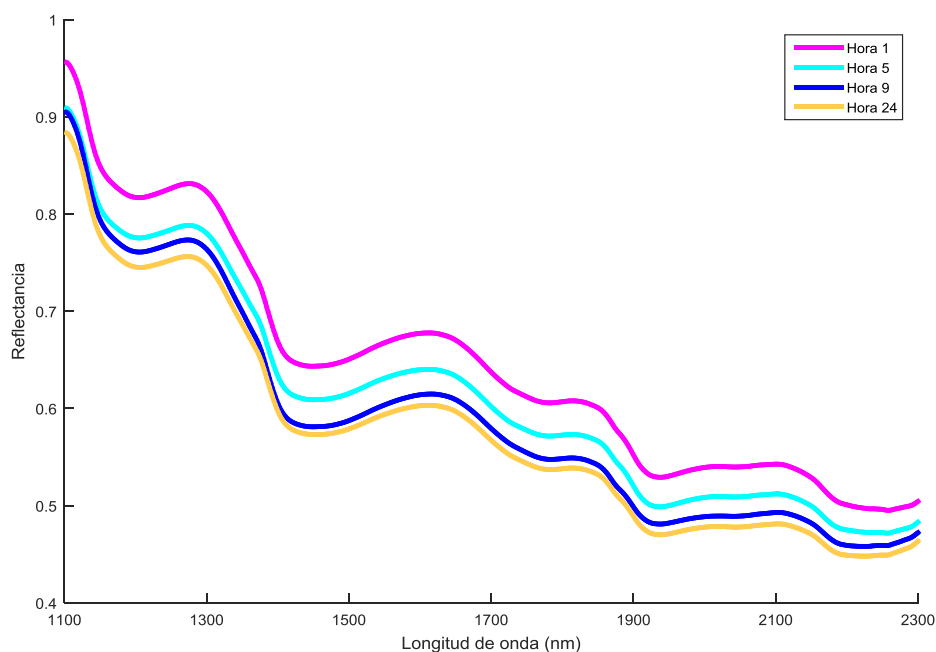


Figura 37. Espectros característicos de los grupos 1h, 5h, 9h y 24h para impactos a 9 cm

La Tabla 19 muestra los resultados del análisis PLS-DA realizado con 8 LV, aplicando los pretratamientos espectrales SNV y MC, para los datos de impacto a 9 cm considerando los cuatro grupos horarios.

Tabla 19. Matriz de confusión para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h con los datos de 9 cm

		Grupo real (%)			
		Hora 1	Hora 5	Hora 9	Hora 24
Grupo estimado (%) Validación externa	Hora 1	83,33	33,33	15,0	0,0
	Hora 5	0,0	25,0	11,66	8,33
	Hora 9	15,0	23,33	68,34	6,67
	Hora 24	1,67	18,34	5,0	85,0

Como se puede observar, al igual que para los datos de impacto a 6 cm, los mejores valores de clasificación se obtienen para los grupos 1h y 24 h, obteniendo unos porcentajes de muestras clasificadas correctamente superiores al 80%. El grupo 5h es el que menor porcentaje de clasificación presenta, ya que solo una cuarta parte de las muestras se clasifican como pertenecientes a este grupo y más de un 33% están incorrectamente asignadas al grupo 1h. Con respecto a los valores de clasificación obtenidos para el grupo 9h, a pesar de que el porcentaje de muestras bien clasificadas es superior al 65%, no se puede decir que sean buenos.

Del mismo modo, los grupos 1h y 24h presentan los valores de sensibilidad y especificidad más altos (superiores a 0,8), mientras que los valores más bajos corresponden al grupo 5h (proporciones superiores a 0,5) (Tabla 20).

Tabla 20. Sensibilidad y Especificidad para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h con los datos de 9 cm

	Sensibilidad		Especificidad	
	Validación cruzada	Validación	Validación cruzada	Validación
Hora 1	0,829	0,883	0,804	0,800
Horas 5	0,590	0,567	0,571	0,500
Horas 9	0,636	0,683	0,703	0,689
Horas 24	0,900	0,900	0,886	0,889

Tanto los porcentajes de clasificación como los valores de sensibilidad y especificidad obtenidos en el análisis, reflejan que el modelo desarrollado para este caso concreto no es capaz de diferenciar de una forma clara las muestras de los cuatro grupos horarios, ya que solo se obtienen buenos resultados para dos de los grupos estudiados (1h y 24h).

La Figura 38 es la representación gráfica de la matriz de confusión de la validación externa obtenida para los 4 grupos horarios (hora 1, hora 5, hora 9 y hora 24) con los datos de impacto a 9 cm. La línea horizontal discontinua indica el umbral por encima del cual una muestra es asignada a un grupo concreto, correspondiendo en este caso los datos localizados por encima del umbral a las muestras clasificadas como grupo Hora 1. Se puede observar cómo la mayor parte de las muestras del grupo hora 1 (83,33%) se clasifican correctamente, mientras que unas pocas muestras del resto de grupos (hora 5, hora 9 y hora 24) aparecen incorrectamente clasificadas como grupo hora 1.

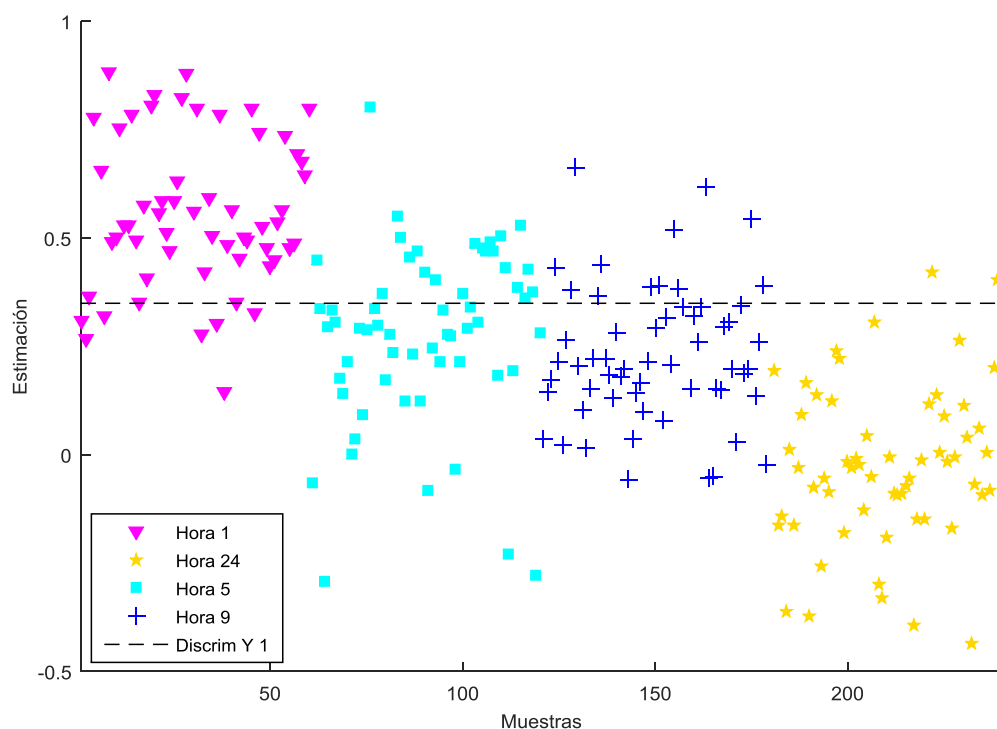


Figura 38. Resultados del modelo PLS-DA para los grupos 1h, 5h, 9h y 24h a impactos de h=9 cm.
Estimación para el grupo 1h en la validación

Los resultados obtenidos en los modelos PLS-DA desarrollados teniendo en cuenta los cuatro grupos horarios indican que, utilizando los datos espectrales obtenidos mediante tecnología NIRS, no se consigue una rigurosa diferenciación entre los daños originados en los tubérculos a las 1, 5, 9 y 24 horas de producirse la carga mecánica. Esto es debido a que un porcentaje importante de muestras pertenecientes a los grupos 5h y 9 h se asignan incorrectamente al resto de grupos, ya que probablemente los daños que aparecen en el transcurso de las horas no son lo suficientemente notables como para poder diferenciar estos dos grupos. Sin embargo, en las horas iniciales y finales de estudio se obtiene una mejor diferenciación.

Nicolai *et al.* (2007) indicaron que, combinando la alta velocidad de adquisición de los espectrofotómetros NIR (como los nuevos con matriz de diodos como red de difracción) con las eficaces técnicas de calibración multivariante (como la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS)), era factible construir sistemas espectroscópicos de clasificación en líneas de fruta y verdura. También, recalcaron que el factor más importante que afecta al rendimiento de este tipo de sistemas es la robustez del modelo, que incluye la capacidad de predecir con precisión las muestras que no fueron utilizadas en la calibración.

Como se ha podido observar, en los modelos PLS-DA desarrollados considerando únicamente dos grupos en el análisis, se obtienen unos valores de clasificación elevados (superiores al 85%), al contrario que en los modelos con cuatro grupos de muestras, en los que la capacidad del modelo para diferenciar los cuatro grupos es baja con unos porcentajes de clasificación en la validación entre un 50-66% (Tabla 12). En un artículo sobre modelos de reconocimiento supervisados en análisis de alimentos, Berrueta *et al.* (2007) indicaron que el modelo PLS-DA funciona mejor si se trabaja con un número pequeño de grupos.

Salvo el estudio realizado por Evans y Muir (1999) mencionado en el apartado de revisión bibliográfica, no se han encontrado estudios publicados referentes a la determinación de daños internos en patata utilizando tecnología NIRS. Sin embargo, la espectrometría NIR de reflectancia combinada con análisis cualitativo PLS-DA se ha utilizado para estudiar los daños internos en tomate (Wu y Wang, 2014) y aguacate (Wedding *et al.*, 2012) con resultados de muestras clasificadas correctamente superiores al 80% en ambos casos.

Los tubérculos empleados en los ensayos de impacto y compresión, se utilizaron para evaluar de forma visual la aparición de daños en los mismos durante los 5 días siguientes a la realización de los ensayos. En la tabla siguiente se muestra el porcentaje de tubérculos dañados para cada parámetro de estudio en los 5 días.

Tabla 21. Porcentaje de tubérculos dañados tras los ensayos de impacto y compresión

		% Tubérculos dañados					
		24h	48h	72h	96h	144h	168h
Impacto							
6 cm		60	60	40	50	-	30
9 cm		40	50	50	50	-	50
Compresión							
2 mm		0	0	0	-	20	10
3 mm		20	10	0	-	20	10

Teniendo en cuenta que cada día se evaluaron 10 patatas diferentes para cada parámetro de estudio, se observa cómo los mayores porcentajes de tubérculos dañados se obtienen en los ensayos de impacto, ya que, a las 24 horas de producirse la carga mecánica, un 60% y un 40% de los tubérculos empleados en los ensayos, a 6 cm y 9 cm respectivamente, presentan daños. Con respecto a los porcentajes obtenidos a las 24 horas de realizar los ensayos de compresión, únicamente se observan daños en un 20% de los tubérculos empleados para las compresiones con una deformación de 3 mm. En general, conforme pasan las horas, el porcentaje de tubérculos dañados se mantiene más o menos igual para todos los parámetros estudiados.

Los porcentajes de tubérculos dañados obtenidos a las 24 horas de realizar los ensayos, concuerdan con los resultados de los análisis PLS-DA realizados considerando los grupos control y 24h, ya que, como se ha podido comprobar, los modelos desarrollados para los datos de impacto son capaces de diferenciar de una forma clara las muestras dañadas de las sanas, debido probablemente a que el número de tubérculos dañados en estos casos es mayor.

5. CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados de este estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

Determinación del umbral de daños

- Los impactos de alta intensidad son poco frecuentes en ambas zonas de la línea, registrándose los valores de impacto más elevados en la Zona 2. Además, cabe destacar que estos impactos se producen en puntos con mayores alturas de caída ($h > 20$ cm) pero sobre materiales más amortiguadores (goma o plástico-goma), por lo que reduciendo la altura de caída en esos puntos, se reduciría la intensidad del impacto y, en consecuencia, el riesgo de daños en los tubérculos.
- En la Zona 1 de la línea se produce un gran número de impactos de baja intensidad sobre materiales menos amortiguadores. Un ejemplo de ello es el caso de la Criba en el que, a pesar de que la intensidad del impacto es baja, el número de golpes registrados en este punto es alto, lo que incrementa el riesgo de daños contra elementos metálicos.
- El Saco es el elemento de la línea en el que se registra el valor de intensidad media de impacto significativamente diferente y superior a los del resto de puntos.
- En toda la línea se han identificado 9 puntos críticos: Criba, Cinta 3, Caída tolva 2, Clasificación, Caída tolva 3, Caída elevador 4, Salto cinta, Cazoletas y Saco.
- Los dos frutos electrónicos empleados diferenciaron de forma similar los impactos producidos en los distintos elementos de la línea de manipulación.
- En la Zona 1 de la línea, correspondiente a la fase de limpieza y clasificación, se observa un porcentaje de tubérculos dañados (presencia de daños internos) de un 30-40%.

Identificación de daños internos

- Combinando la espectroscopía de reflectancia NIR con el método de análisis multivariante PLS-DA para las muestras sometidas a impactos a una altura de caída de 6 y 9 cm, es posible diferenciar de forma clara los tubérculos dañados de los sanos con porcentajes de muestras clasificadas correctamente superiores al 85%, cuando el porcentaje de tubérculos dañados es de un 40-60%.
- Con los modelos desarrollados a partir de los datos espectrales de los tubérculos sometidos a impactos, nos es posible distinguir claramente entre los daños presentes en los tubérculos transcurridas 1, 5, 9 y 24 horas desde la aplicación de la carga.

Los resultados obtenidos en este estudio plantea la posibilidad de introducir estas técnicas en las líneas de clasificación y envasado de patata, con el fin de identificar y gestionar de forma adecuada los tubérculos dañados antes de su venta, reduciendo así las pérdidas económicas asociadas a estos daños.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 207-225. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00086-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00086-6)
- Alvarez, M. D., Canet, W., & López, M. E. (2002). Influence of deformation rate and degree of compression on textural parameters of potato and apple tissues in texture profile analysis. *European Food Research and Technology*, 215(1), 13-20. doi: 10.1007/s00217-002-0515-0
- Amigo, J. M. (2010). Practical issues of hyperspectral imaging analysis of solid dosage forms. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 398(1), 93-109.
- Anónimo. (2000-2013). Superficies y producciones agrícolas: Patata. *Estadísticas agrícolas* Retrieved 19th February, 2015, from http://www.navarra.es/home_es/Temas/Ambito+rural/Vida+rural/Observatorio+agrario/Agricola/Informacion+estadistica/
- Anónimo. (2005a). Variedad Baraka. *The European Cultivated Potato Database* Retrieved 23th January, 2015, from http://www.europotato.org/display_description.php?variety_name=Baraka
- Anónimo. (2005b). Variedad Kennebec. *The European Cultivated Potato Database* Retrieved 23th January, 2015, from http://www.europotato.org/display_description.php?variety_name=Kennebec
- Anónimo. (2008). Legado Andino. *Año Internacional de la Papa* Retrieved 30th January, 2015, from <http://www.fao.org/potato-2008/es/>
- Anónimo. (2011). BIOinteresante: Patata. *Consejo de la Producción Agraria Ecológica de Navarra* Retrieved 24th February, 2015, from <http://www.cpaen.org/menu-oscuro/biointeresante/patata.html>
- Anónimo. (2014). Medida 10 Agroambiente y Clima. Submedida 10.1 "Ayuda para compromisos agroambientales y climáticos". Operación "Ayuda para la producción integrada de patata de siembra".
- Arana, I., Jarén, C., & Arazuri, S. (2007). Sensory and mechanical characterization of mealy apples and woolly peaches and nectarines. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 5(2), 101-106.
- Arazuri, S. (2012). Mechanical Damage of Foods. In I. Arana (Ed.), *Physical Properties of Foods : Novel Measurement Techniques and Applications* (pp. 221-236): CRC Press.
- Arazuri, S., Jarén, C., Arana, J. I., & Pérez de Ciriza, J. J. (2007). Influence of mechanical harvest on the physical properties of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Food Engineering*, 80(1), 190-198. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.008>

- Arazuri, S., Jarén, C., Juanena, A., Martínez, F., & Pérez de Ciriza, J. (2001). Daños producidos por las cosechadoras de tomate. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*(151), 28-35.
- Bajema, R. W., Hyde, G. M., & Baritelle, A. L. (1998). Temperature and strain rate effects on the dynamic failure properties of potato tuber tissue. *Transactions of the ASAE*, 41(3), 733-740.
- Ballabio, D., & Consonni, V. (2013). Classification tools in chemistry. Part 1: linear models. PLS-DA. [10.1039/C3AY40582F]. *Analytical Methods*, 5(16), 3790-3798. doi: 10.1039/c3ay40582f
- Baritelle, A., Hyde, G., Thornton, R., & Bajema, R. (2000). A Classification System for Impact-Related Defects in Potato Tubers. *American Journal of Potato Research*, 77(3), 143-148. doi: 10.1007/bf02853938
- Barreiro, P., & Ruiz Altisent, M. (1996). Propiedades mecánicas y calidad de frutos. Definiciones y medidas instrumentales. *Fruticultura profesional*(77), 48-55.
- Bentini, M., Caprara, C., & Martelli, R. (2006). Harvesting Damage to Potato Tubers by Analysis of Impacts recorded with an Instrumented Sphere. *Biosystems Engineering*, 94(1), 75-85. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.02.007>
- Bergera, G., Jarén, C., Arazuri, S., & Arana, I. (2006). Instrumentación para la espectroscopía de infrarrojo cercano. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*(194), 30-33.
- Berrueta, L. A., Alonso-Salces, R. M., & Héberger, K. (2007). Supervised pattern recognition in food analysis. *Journal of Chromatography A*, 1158(1-2), 196-214. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2007.05.024>
- Blahovec, J. (2001). Static mechanic and texture of fruits and vegetables. *Research in Agricultural Engineering*, 47(4), 150-175.
- Bohl, W. H. (2006). *Potato Harvest Management*. Paper presented at the Potato Conference, Idaho. <http://www.cals.uidaho.edu/potatoes/Research&Extension/Topic/Harvest/PotatoHarvestManagement-06.pdf>
- Bourne, M. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement* (2 ed.): Elsevier Science and Technology Books.
- Bradshaw, J. E., & Ramsay, G. (2009). Potato Origin and Production. In J. Singh & L. Kaur (Eds.), *Advances in Potato Chemistry and Technology* (pp. 1-26). San Diego: Academic Press.

- Broothaerts, W., Corbisier, P., Emons, H., Emteborg, H., Linsinger, T. P. J., & Trapmann, S. (2007). Development of a certified reference material for genetically modified potato with altered starch composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(12), 4728-4734. doi: 10.1021/jf0701584
- Brunt, K., & Drost, W. (2010). Design, Construction, and Testing of an Automated NIR In-line Analysis System for Potatoes. Part I: Off-line NIR Feasibility Study for the Characterization of Potato Composition. *Potato Research*, 53(1), 25-39. doi: 10.1007/s11540-010-9149-y
- Brunt, K., & Drost, W. C. (2003). *Determination of potato quality by NIR*. Paper presented at the Revealing Secrets of the Process. Fifth European Symposium on Near Infrared (NIR) Spectroscopy, Kolding, Denmark.
- Brunt, K., Smits, B., & Holthuis, H. (2010). Design, Construction, and Testing of an Automated NIR In-line Analysis System for Potatoes. Part II. Development and Testing of the Automated Semi-industrial System with In-line NIR for the Characterization of Potatoes. *Potato Research*, 53(1), 41-60. doi: 10.1007/s11540-010-9148-z
- Bueno, J., & Expido, J. (2006). Mecanización del cultivo de la patata. I parte. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*(192), 20-25.
- Cuesta, L. M., Gil, A. J., & Remiro, F. (1991). *Electrónica Analógica*: McGraw-Hill/Interamericana S.A.
- Diezma, B., Marañón, A., Ruiz Altisent, M., Flores, L., & Diez, J. (2001). Firmeza de la fruta: determinación por métodos no destructivos. *Horticultura* 154, 1-7.
- Ducreux, L. J., Morris, W. L., Prosser, I. M., Morris, J. A., Beale, M. H., Wright, F., Taylor, M. A. (2008). Expression profiling of potato germplasm differentiated in quality traits leads to the identification of candidate flavour and texture genes. *Journal of experimental botany* (59), 4219-4231.
- Evans, S. D., & Muir, A. Y. (1999). Reflectance spectrophotometry of bruising in potatoes. I. Ultraviolet to near infrared. *International Agrophysics*, 13, 203-209.
- Expido, J., Bueno, J., & Van Canneyt, T. (2005). *Impact Detection in Potato Handling Lines with Sensors Based on Tri-axial Accelerometers*. Paper presented at the V International Postharvest Symposium.
- FAOSTAT. (1990-2013). Producción, Comercio y Balances alimentarios. *Dirección de Estadística* Retrieved 12th February, 2015, from http://faostat3.fao.org/download/FB/*/S
- Fernández-Ahumada, E., Garrido-Varo, A., Guerrero-Ginel, J. E., Wubbels, A., Van der Sluis, C., & Van der Meer, J. M. (2006). Understanding factors affecting near infrared analysis of potato constituents. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 14(1), 27-35.

- Frank Bollen, A. (2006). Technological innovations in sensors for assessment of postharvest mechanical handling systems. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 1(1), 16-31.
- Friedman, H. H., Whitney, J. E., & Szczesniak, A. S. (1963). The Texturometer—A New Instrument for Objective Texture Measurement. *Journal of Food Science*, 28(4), 390-396. doi: 10.1111/j.1365-2621.1963.tb00216.x
- García, G. (2011). *Guía de Cultivo.Orientaciones para el cultivo de la patata para fresco en Asturias*. Retrieved from http://www.costanoroeste.org/administracion/documentacion/GUIA_PATATA_PDF.pdf
- Gracia López, C., & Traver Sanchis, F. (2007). *Ensayos de daños mecánicos en patata temprana*. Paper presented at the Actas de Horticultura. XI Congreso Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Albacete.
- Haase, N. U. (2003). Estimation of dry matter and starch concentration in potatoes by determination of under-water weight and near infrared spectroscopy. *Potato Research*, 46(3-4), 117-127. doi: 10.1007/bf02736081
- Haase, N. U. (2006). Rapid Estimation of Potato Tuber Quality by Near-Infrared Spectroscopy. *Starch - Stärke*, 58(6), 268-273. doi: 10.1002/star.200500403
- Haase, N. U. (2011). Prediction of potato processing quality by near infrared reflectance spectroscopy of ground raw tubers. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19(1), 37-45.
- Hartmann, R., & Büning-Pfaue, H. (1998). NIR determination of potato constituents. *Potato Research*, 41(4), 327-334. doi: 10.1007/bf02358965
- Heise, H. M., & Winzen, R. (2002). Chemometrics in Near-Infrared Spectroscopy. In H. W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata & H. M. Heise (Eds.), *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications* (pp. 125-162): Wiley-VCH.
- Herold, B., Truppel, I., & Geyer, M. (2005). *Miniaturised sensor to detect mechanical impacts on real perishables*. Paper presented at the FRUTIC 05, Information and technology for sustainable fruit and vegetable production, Montpellier, France.
- Herold, B., Truppel, I., Siering, G., & Geyer, M. (1996). A Pressure Measuring Sphere for monitoring handling of fruit and vegetables. *Computers and electronics in agriculture*, 15(1), 73-88. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1699\(96\)00004-X](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1699(96)00004-X)
- Hesen, J., & Kroesbergen, E. (1960). Mechanical damage to potatoes I. *European Potato Journal*, 3(1), 30-46. doi: 10.1007/BF02366080
- Huamán, Z. (1986). Systematic botany and morphology of the potato. Technical Information Bulletin 6. *International Potato Center. Lima, Peru* 22.
- Hughes, J. (1980). Potatoes I: factors affecting susceptibility to damage. *Span*, 23, 65-67.

- Hyde, G., Brown, G., Timm, R., & Zhang, W. (1992). Instrumented sphere evaluation of potato packing line impacts. *Transactions of the ASAE* 35(1), 65-69.
- Isaksson, T., & Næs, T. (1990). Selection of samples for calibration in near-infrared spectroscopy. Part II: Selection based on spectral measurements. *Applied Spectroscopy*, 44(7), 1152-1158.
- Jarén, C., Arazuri, S., & Arana, I. (2008). Electronic fruits and other sensors. *Chronica Horticulturae*, 48(4), 4-6.
- Jarén, C., & García-Pardo, E. (2002). Using non-destructive impact testing for sorting fruits. *Journal of Food Engineering*, 53(1), 89-95. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00144-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00144-3)
- Kaur, L., Singh, N., Singh Sodhi, N., & Singh Gujral, H. (2002). Some properties of potatoes and their starches I. Cooking, textural and rheological properties of potatoes. *Food chemistry*(79), 177-181.
- Kawata, S. (2002a). Instrumentation for Near-Infrared Spectroscopy. In H. W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata & H. M. Heise (Eds.), *Near-Infrared Espectroscopy: Principles, Instruments, Applications* (pp. 43-73): Wiley-VCH.
- Kawata, S. (2002b). New Techniques in Near-Infrared Spectroscopy. In H. W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata & H. M. Heise (Eds.), *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications* (pp. 75-84): Wiley-VCH.
- Kestens, V., Charoud-Got, J., Bau', A., Bernreuther, A., & Emteborg, H. (2008). Online measurement of water content in candidate reference materials by acousto-optical tuneable filter near-infrared spectrometry (AOTF-NIR) using pork meat calibrants controlled by Karl Fischer titration. *Food chemistry*, 106(4), 1359-1365. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.081>
- Liu, Q., Donner, E., Tarn, R., Singh, J., & Chung, H. J. (2009). Advanced analytical techniques to evaluate the quality of potato and potato starch. *Advances in Potato Chemistry and Technology*, 221-248.
- López, A., Arazuri, S., García, I., Mangado, J., & Jarén, C. (2013). A Review of the Application of Near-Infrared Spectroscopy for the Analysis of Potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(23), 5413-5424. doi: 10.1021/jf401292j
- MAGRAMA. (2002-2013). Superficies y producciones de cultivos: Patata. *Anuario de Estadística* Retrieved 19th February, 2015, from <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/#para2>
- Mark, H. (1992). Data Analysis: Multilinear Regression and Principal Component Analysis. In D. A. Burns & E. W. Ciurczak (Eds.), *Handbook of Near-Infrared Analysis* (Vol. 13, pp. 107-158). New York: Marcel Dekker, Inc.

- Martens, H., & Martens, M. (2001). *Multivariate Analysis of Quality: An Introduction*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Martens, H., & Naes, T. (1989). Methods for Calibration *Multivariate Calibration* (pp. 73-236). Chichester: John Wiley & Sons.
- Massart, D. L., Vandeginste, B. G. M., Buydens, L. M. C., de Jong, S., Lewi, P. J., & Smeyers-Verbeke, J. (1997). Introduction. In B. G. M. Vandeginste & S. C. Rutan (Eds.), *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part A* (Vol. 20A, pp. 1-20): Elsevier.
- Mathew, R., & Hyde, G. M. (1997). Potato impact damage thresholds. *Transactions of the ASAE*, 40(3), 705-709.
- McDermott, L. P. (1988). Near-Infrared reflectance analysis of processed foods. *Cereal Foods World*, 33(6), 498-502.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics and mechanical properties* (Vol. 1): Gordon and Breach Science Publishers.
- Molema, G., Bouman, A., Verwijs, B., Van Den Berg, J., & Klooster, J. (2000). Subcutaneous tissue discoloration in ware potatoes. 1. A chain analysis in the Netherlands. *Potato Research*, 43(3), 211-224.
- Molema, G., Struik, P., Verwijs, B., Bouman, A., & Klooster, J. (2000). Subcutaneous tissue discoloration in ware potatoes. 2. Impact measured by an instrumented sphere. *Potato Research*, 43(3), 225-238.
- Molema, G. J. (1999). *Mechanical force and subcutaneous tissue discolouration in potato*. PhD thesis, Wageningen Universiteit, Wageningen. Retrieved from <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/970388>
- Müller, I., Machado de Brito, R., & Bender, R. (2008). *Instrumented sphere for compression analysis*. Paper presented at the Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, Vancouver Island, Canada.
- Naes, T., & Isaksson, T. (1989). Selection of samples for calibration in near-infrared spectroscopy. Part I: General principles illustrated by example. *Applied Spectroscopy*, 43(2), 328-335.
- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., & Davies, T. (2002a). Introduction *A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification* (pp. 5-10). Chichester, UK: NIR Publications.
- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., & Davies, T. (2002b). Outlier detection *A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification* (pp. 177-190). Chichester, UK: NIR Publications.
- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., & Davies, T. (2002c). Qualitative analysis/classification *A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification* (pp. 221-260). Chichester, UK: NIR Publications.

- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., & Davies, T. (2002d). Scatter correction of spectroscopic data A *User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification* (pp. 105-125). Chichester, UK: NIR Publications.
- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., & Davies, T. (2002e). Selection of samples for calibration A *User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification* (pp. 191-200). Chichester, UK: NIR Publications.
- Ni, Y., Mei, M., & Kokot, S. (2011). Analysis of complex, processed substances with the use of NIR spectroscopy and chemometrics: Classification and prediction of properties — The potato crisps example. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 105(2), 147-156. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemolab.2010.12.003>
- Nicolaï, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46(2), 99-118. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.024>
- Noble, R. (1985). The relationship between impact and internal bruising in potato tubers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(2), 111-121.
- Osborne, B. G., Fearn, T., & Hindle, P. H. (1993). Theory of near infrared spectrophotometry *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis* (2 ed., pp. 13-35): Longman Scientific & Technical.
- Otto, M. (1999). Pattern recognition and classification *Chemometrics. Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry* (pp. 119-174): Wiley-VCH.
- Parikh, R., Mathai, A., Parikh, S., Chandra Sekhar, G., & Thomas, R. (2008). Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values. *Indian Journal of Ophthalmology*, 56(1), 45-50.
- Pedreschi, F., Segtnan, V. H., & Knutsen, S. H. (2010). On-line monitoring of fat, dry matter and acrylamide contents in potato chips using near infrared interactance and visual reflectance imaging. *Food Chemistry*, 121(2), 616-620. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.075>
- Peeten, H., Folkertsma, S., Schipper, J., Baarveld, H., & Van der Kleijn, S. (2011). Variedad Baraka. *Netherlands Catalogue of Potato Varieties* Retrieved 19th February, 2015, from <http://www.aardappelpagina.nl/es>
- Peeten, H., Folkertsma, S., Schipper, J., Baarveld, H., & Van der Kleijn, S. (2011). Variedad Kennebec. *Netherlands Catalogue of Potato Varieties* Retrieved 19th February, 2015, from <http://www.aardappelpagina.nl/es>
- Peiris, K. H. S., Dull, G. G., Leffler, R. G., & Kays, S. J. (1999). Spatial variability of soluble solids or dry-matter content within individual fruits, bulbs, or tubers: Implications for the development and use of NIR spectrometric techniques. *HortScience*, 34(1), 114-118.

- Peters, R. (1996). Damage of potato tubers, a review. *Potato Research*, 39(4), 479-484. doi: 10.1007/bf02358463
- Rady, A. M. (2013). *Evaluation of surface effect, on mechanical damage of potato tubers using different methods*. Paper presented at the ASABE Annual International Meeting, St. Joseph, Michigan.
- Rady, A. M., & Guyer, D. E. (2015). Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes: A review. *Computers and electronics in agriculture*, 117, 31-48. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.07.002>
- Ríos, D., Ghislain, M., Rodríguez, F., & Spooner, D. M. (2007). What Is the Origin of the European Potato? Evidence from Canary Island Landraces *Crop Sci.*, 47(3), 1271-1280. doi: 10.2135/cropsci2006.05.0336
- Ruiz Altisent, M. (1988). Calidad de los frutos, resistencia a los daños mecánicos. *El Cultivador Moderno*(827), 26-28.
- Ruiz, M. (1989). Mecanización de los cultivos hortícolas. *El Campo: Boletín de Información Agraria*(112), 33-36.
- Salar, M. (2009). *Determinación de daños durante la recolección mecanizada y la manipulación de patata*. Tesis Doctoral, Universidad Pública de Navarra, Pamplona.
- Salar, M., Jaren, C., Arazuri, S., Arana, I., García, M. J., & Viscarret, J. (2009). Modificaciones en las propiedades físicas de las patatas durante la recolección mecánica. *Tierras de Castilla y León*(160), 28-34.
- Scanlon, M. G., Pritchard, M. K., & Adam, L. R. (1997). *NIR analysis of dry matter and sugars in whole potato tubers*. Paper presented at the Sensors for Nondestructive Testing: Measuring the Quality of Fresh Fruits and Vegetables. International Conference, Orlando, Florida.
- Shenk, J. S., & Westerhaus, M. O. (1995). Routine operation, calibration, development and network system management manual: NIRSystems, Inc., 12101 Tech Road, Silver Spring. MD 20904, USA.
- Shenk, J. S., & Westerhaus, M. O. (1996). Calibration the ISI way. In A. M. C. Davies & P. Williams (Eds.), *Near Infrared Spectroscopy: The future waves* (pp. 198-202). Chichester, UK: NIR Publications.
- Shiroma, C., & Rodriguez-Saona, L. (2009). Application of NIR and MIR spectroscopy in quality control of potato chips. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 596-605. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2008.09.003>
- Siesler, H. W. (2002). Introduction. In H. W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata & H. M. Heise (Eds.), *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications* (pp. 1-10): Wiley-VCH.

- Skoog, D. A., & Leary, J. J. (1996). *Análisis Instrumental* (Cuarta edición ed.): McGraw-Hill/Interamericana S.A.
- Spooner, D. M., & Hetterscheid, W. L. (2006). Origins, evolution, and group classification of cultivated potatoes. In T. J. Motley, N. Zerega & H. Cross (Eds.), *Darwin's harvest: New approaches to the origins, evolution, and conservation of crops* (pp. 285-307). New York: Columbia University Press.
- Stone, M. (1974). Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 36(2), 111-147.
- Struik, P. C. (2007). Above-ground and below-ground plant development. In D. V. J. Bradshaw, C. Gebhardt, F. Govers, D. K. Mackerron, M. A. Taylor & H. A. Ross (Eds.), *Potato Biology and Biotechnology: Advances and perspectives* (pp. 219-236). Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Subedi, P. P., & Walsh, K. B. (2009). Assessment of Potato Dry Matter Concentration Using Short-Wave Near-Infrared Spectroscopy. *Potato Research*, 52(1), 67-77. doi: 10.1007/s11540-008-9122-1
- Thornton, R. E., Smittle, D. A., & Peterson, C. L. (1974). Reducing potato damage during harvest. *Washington State University, Extensión Bulletin 0646 Cooperative Extension Service*.
- Van Canneyt, T., Tijskens, E., Ramon, H., Verschoore, R., & Sonck, B. (2003). Characterisation of a Potato-shaped Instrumented Device. *Biosystems Engineering*, 86(3), 275-285. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.003>
- Vitale, R., Bevilacqua, M., Bucci, R., Magrì, A. D., Magrì, A. L., & Marini, F. (2013). A rapid and non-invasive method for authenticating the origin of pistachio samples by NIR spectroscopy and chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 121, 90-99. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemolab.2012.11.019>
- Wedding, B. B., Wright, C., Grauf, S., & White, R. D. (2012). *The application of near infrared spectroscopy for the assessment of avocado quality attributes*. Rijeka, Croatia: InTech.
- Wilson, J. H., & Lindsay, A. M. (1969). The relation between specific gravity and dry matter content of potato tubers. *American Potato Journal*, 46(9), 323-328. doi: 10.1007/bf02862002
- Williams, P., & Sobering, D. (1996). How do we do it: a brief summary of the methods we use in developing near infrared calibrations. In A. M. C. Davies & P. Williams (Eds.), *Near infrared spectroscopy: The future waves* (pp. 185-188). Chichester, UK: NIR Publications.
- Wu, G., & Wang, C. (2014). Investigating the effects of simulated transport vibration on tomato tissue damage based on vis/NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 98, 41-47. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.06.016>

Yu, P., Li, C., Takeda, F., Krewer, G., Rains, G., & Hamrita, T. (2012). Quantitative evaluation of a rotary blueberry mechanical harvester using a miniature instrumented sphere. *Computers and electronics in agriculture*, 88(0), 25-31. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2012.06.005>